

CENTRE INTERNATIONAL D'ETUDES SUPERIEURES EN SCIENCES
AGRONOMIQUES MONTPELLIER - **SupAgro**

Ecole Doctorale SIBAGHE

(Ecole Doctorale Systèmes intégrés en Biologie, Agronomie,
Géosciences, Hydrosiences, Environnement)



THESE

Pour l'obtention du grade de : Docteur de Montpellier SupAgro

Formation Doctorale : Ecosystèmes

Discipline : Agronomie

Présentée et soutenue publiquement par

Ngoc Quyen LUU

Le 2 Octobre 2012

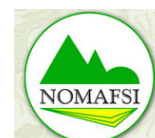
**Introduction d'une culture de printemps dans les systèmes de culture
des « terres irrigables » des montagnes du Nord du Vietnam.
Approche par modèle agroclimatique**

Directeur de thèse
Alain CAPILLON

Co-encadrant
François AFFHOLDER

Devant le Jury :

- | | | | |
|----|---------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 1. | Jacques CANEILL | Professeur, AgroSup Dijon | Rapporteur |
| 2. | Benjamin SULTAN | Université Pierre et Marie Curie | Rapporteur |
| 3. | Alain CAPILLON | Professeur, SupAgro Montpellier | Directeur de thèse |
| 4. | François AFFHOLDER | Chercheur, CIRAD | Examineur |
| 5. | Jacques WERY | Professeur, SupAgro Montpellier | Examineur |
| 6. | Pham Thi SEN | Chercheur, NOMAFSI du Vietnam | Examineur |



Remerciements

D'abord je tiens à remercier le Gouvernement vietnamien, le Ministère de l'Education et de la Formation ainsi que l'Ambassade de France et le CROUS, pour leur soutien financier et social pendant ces quatre années de thèse.

Je remercie le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) d'avoir financé cette thèse, et d'avoir cru en la pertinence et l'intérêt de ce sujet, notamment l'unité de recherche SCA et l'équipe CESCA pour les expérimentations sur les terrains au Vietnam. Je remercie aussi l'UMR System pour son accueil et son soutien humain et matériel lors de ma première année de thèse.

Je remercie le NOMAFSI (Northern Mountainous Agriculture and Forestry Science Institute), mon lieu de travail au Vietnam, qui m'a donné les moyens de réaliser des expérimentations durant les deux années notamment sur des parcelles de l'institut. Je remercie le comité populaire de la commune de Suoi Giang m'a apporté son aide pour les essais sur les parcelles des agriculteurs pendant les deux années d'expérimentation.

Je tiens à exprimer une nouvelle fois mes sincères remerciements à François Affholder, pour son encadrement, lui qui s'est investi du début jusqu'à la fin de ma thèse. Je voudrais également remercier Alain Capillon, directeur de ma thèse, d'avoir accepté la direction de cette thèse et de m'avoir accueilli au sein de l'UMR System. Merci également à Jacques Caneill et Benjamin Sultan, d'avoir accepté de lire ma thèse et d'en être rapporteur. Merci également à Jacques Wery et Quoc Doanh Le d'avoir accepté de faire partie du jury de thèse. Un grand merci du fond du cœur, grâce à vous j'ai consolidé davantage mon goût pour la recherche, je ne vous remercierai jamais assez.

Par la même occasion, je remercie Florent Maraux, Directeur de l'UR SCA et l'ensemble du personnel de l'UR SCA, ainsi que Pabblo Tittonell, chef de l'équipe CESCA, où j'ai passé trois années de la thèse, pour leur accueil et leur soutien.

Je tiens à remercier Cécile Fovet-Rabot, Aude Ripoché pour avoir relu et corrigé avec attention les différents chapitres de cette thèse et pour leur participation à la rédaction d'articles. Je les remercie également pour l'attention qu'elles m'ont accordée, pour leur disponibilité, les conseils précieux et fructueux qu'elles n'ont cessé de me prodiguer.

Merci aussi aux personnes du département culture annuel du NOMAFSI pour leur aide précieuse : Nguyen Van Nien, Nguyen Thi Huong, Nguyen Phuc Chung, Nguyen Van Giang qui ont travaillé avec moi sur les terrains au Vietnam pendant deux ans. Je remercie aussi Julie Iglesias, une stagiaire française qui a travaillé sans relâche avec moi au printemps en 2010 au Vietnam.

Merci sincèrement à tous les amis du bâtiment 7 du CIRAD et les amis vietnamiens à Montpellier, qui m'ont toujours encouragé et partagé mes difficultés.

Je remercie le personnel de l'UMR System et de SupAgro Montpellier pour leurs encouragements et leurs amitiés.

Merci à toute ma famille, pour leur amour et leur soutien. Je remercie mes parents, ma femme et mes enfants qui n'ont ménagé aucun effort pour ma réussite.

Merci encore à tous !

Résumé

L'objectif est d'évaluer sur le plan agro-climatique les options de réalisation d'une culture de printemps dans les hautes vallées du Nord du Vietnam. A partir d'hypothèses sur les contraintes agro-climatiques s'exerçant sur ces options, un modèle de simulation et le dispositif expérimental permettant de le caler et de l'évaluer ont été élaborés. Une expérimentation virtuelle remplaçant les cultures de printemps envisagées (riz, riz « aérobique », maïs et soja) dans le climat de trois régions contrastées sur ce plan a ensuite été réalisée, le long d'un gradient d'altitude, et sous différentes modalités techniques, notamment de dates de semis. Cette démarche a été appliquée successivement aux deux grands cas rencontrés dans les montagnes : irrigation des parcelles dès le printemps, et conduite en régime pluvial (irrigation praticable seulement pour le cycle estival). Elle a conduit à identifier, pour chacun de ces cas et chacune des régions et cultures étudiées, des fenêtres de semis favorables, intervalles de dates de semis pour lesquelles la culture de printemps présente peu de risques. La taille de cette fenêtre constitue ainsi un indicateur synthétique de la contrainte climatique pour une culture donnée dans un lieu donné : plus cette fenêtre est étroite, plus on peut s'attendre à ce qu'il soit délicat pour les producteurs de pratiquer la culture.

Les résultats confirment clairement que même lorsque l'eau d'irrigation est abondante, le climat des montagnes du Vietnam ne permet pas partout de pratiquer une culture de printemps. Les risques identifiés sont la destruction par le froid pendant les stades précoces de la croissance végétative, l'allongement du cycle au-delà de la date où le riz irrigué d'été doit être installé selon la pratique actuelle, l'obtention de rendements nettement abaissés du fait de la faiblesse du rayonnement global et des températures pendant la première partie de la saison. Pour ce contexte irrigué, la culture qui échappe le mieux à ces contraintes dans les simulations est le soja, suivie du maïs et du riz conduit en semis en plein champ. Le riz semé en pépinière et repiqué est apparu comme le plus sensible aux contraintes de températures.

En conditions pluviales, la culture de printemps est nettement plus délicate tout particulièrement à cause des retards de levée et des stress hydriques pendant la phase de croissance végétative liés aux faibles précipitations de début de saison. Le soja reste la culture pour laquelle la contrainte de durée de cycle est la plus faible, mais son rendement simulé est fortement réduit par les stress hydriques. Le riz « aérobique » et le maïs sont des options envisageables en conditions strictement pluviales aux altitudes relativement modestes dans tous les climats étudiés. La géographie de l'extension des cultures de printemps au Vietnam est ainsi esquissée. Des perspectives de recherche sont proposées en vue d'accroître cette aire d'extension. Outre ces acquis importants pour l'agriculture locale, cette thèse confirme l'intérêt et l'efficacité d'une approche de modélisation *ad hoc* pour ce type de question agro-climatique.

Abstract

The goal of this thesis was to assess the agro-climatic feasibility of introducing a supplementary crop during the spring season in the high valleys of the mountainous northern Vietnam. From hypotheses drawn about the way climate constrained such crops, a simulation model and the experimental device required for calibrating and evaluating it were elaborated. A virtual experiment was carried out in order to submit the candidate crops (rice, “aerobic rice”, maize and soybean) under the contrasted climates of three regions, along the elevation gradient and under several technical management, especially sowing dates. This approach was applied consecutively to the two major cases occurring in these mountains: crop irrigated during the whole spring, and rainfed crop (land irrigable during summer only). This approach led to identify, for each of these two cases and for each of the studied regions and crops, favourable sowing windows, *i.e.* intervals of sowing dates for which the risks associated to spring crop are low. The size of such windows provides a synthetic indicator of the climatic constraint for a given crop at a given place: the narrower the window, the more difficult it is expected to be for farmers to practice the option.

Results clearly confirmed that even if irrigation water is abundant, the climate of the mountains in Vietnam does not allow practicing the spring crop everywhere. The risks that were identified were crop destruction by lethally cold temperature during early vegetative stages, maturity delayed beyond the date at which the irrigated rice of summer must have been sown according to current practice, and obtaining yield neatly decreased due to low global radiation and temperature during the first half of the season.

Under irrigated conditions, the simulated crop that best escaped these constraints was soybean, followed by maize and direct seeded rice. Rice sown in nurseries and transplanted showed more sensitive to temperature constraints.

Spring crop showed strongly trickier under rainfed conditions, especially due to delays in seedlings emergence and water stresses during vegetative growth, in relation with low rainfall during the early part of the season. Soybean remained the crop with the shortest duration, but its simulated yield was strongly reduced by water stresses. “Aerobic rice” and maize were possible options under fully rainfed regime at relatively low elevations only, under any of the regional climates studied.

Thus, the feasibility area of spring crops was thus sketched. Research perspectives were proposed, aiming at increasing this area. Additionally to these results, targeted at serving local agriculture, this work confirmed the value and effectiveness of an *ad hoc* modelling approach for agro-climatic studies of this kind.

Tables des matières

| | |
|--|-----------|
| TABLE DES ILLUSTRATIONS | 7 |
| 1. Liste de figures | 7 |
| 2. Liste de tableaux..... | 11 |
| ABRÉVIATIONS ET SIGLES | 12 |
| LISTE DES PARAMÈTRES DU MODÈLE (TRYSIM ET WATRYSIM) | 13 |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE..... | 14 |
| CHAPITRE 1. CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE, MÉTHODOLOGIE | 16 |
| 1. Contexte agricole..... | 16 |
| 1.1. La zone montagneuse du Nord du Vietnam : un fort besoin de développement dans un environnement naturel très contraint | 16 |
| 1.2. Face au manque de surface agricole, le développement agricole passe par l'intensification de l'agriculture | 16 |
| 1.3. Planter une culture de printemps dans les vallées impose de lever de lourdes contraintes climatiques..... | 20 |
| 2. Problématique..... | 22 |
| 3. Démarche générale..... | 23 |
| 4. Méthodologie : modèle agro-climatique et démarche expérimentale | 24 |
| 4.1. Choix des localités et définitions des variables du modèle agro-climatique | 24 |
| 4.2. Matériels et méthodes des dispositifs expérimentaux de terrain | 26 |
| 4.3. Etapes de construction et d'utilisation de notre modèle agro-climatique | 29 |
| CHAPITRE 2. CONTRAINTES DE TEMPÉRATURE ET DE RAYONNEMENT POUR LA CULTURE DE PRINTEMPS | 32 |
| ABSTRACT..... | 33 |
| 1. INTRODUCTION | 34 |
| 2. MATERIALS AND METHODS..... | 35 |
| 2.1 Study region and general methodology | 35 |
| 2.2. Model description | 36 |
| 2.3. Experiments for model calibration..... | 40 |
| 2.4. Model calibration | 41 |
| 2.5. Virtual experiment | 41 |
| 3. RESULTS | 43 |

| | |
|---|------------|
| 3.1. Growth conditions established in the experiment..... | 43 |
| 3.2. Model calibration | 44 |
| 3.3. Virtual experiment | 48 |
| 4. DISCUSSION | 54 |
| 5. CONCLUSION..... | 56 |
| CHAPITRE 3. CONTRAINTES HYDRIQUES POUR LA CULTURE DE PRINTEMPS DANS LES SYSTÈMES DE CULTURE DES TERRES IRRIGABLES DES MONTAGNES DU NORD DU VIETNAM | |
| 1. Introduction..... | 57 |
| 2. Matériels et méthodes | 58 |
| 2.1. Le modèle utilisé | 58 |
| 2.2. Le dispositif expérimental | 62 |
| 2.3. Calage du modèle | 64 |
| 2.4. Simulation des scénarios..... | 66 |
| 3. Résultats | 68 |
| 3.1. Caractéristiques des sols expérimentaux | 68 |
| 3.2. Conditions hydriques des vallées de montagne du Nord du Vietnam | 68 |
| 3.3. Calage du modèle | 69 |
| 3.4. Scénarios de cultures de printemps sous contrainte hydrique | 75 |
| 4. Discussion..... | 80 |
| 4.1. Modélisation du bilan hydrique | 80 |
| 4.2. Modélisation de la germination et de la levée | 80 |
| 4.3. Modélisation du LAI, de la biomasse et du rendement..... | 81 |
| 4.4. Poids relatif de la contrainte hydrique et des autres contraintes climatiques pour la faisabilité d'une culture pluviale au printemps..... | 81 |
| 5. Conclusion | 87 |
| CHAPITRE 4 : MARGES DE MANŒUVRE TECHNIQUE POUR RÉDUIRE LES CONTRAINTES CLIMATIQUES..... | |
| 1. Analyse de sensibilité du modèle..... | 88 |
| 2. Evaluation des principales techniques envisageables | 93 |
| 2.1. Sélection variétale | 93 |
| 2.2. Irrigation | 94 |
| 2.3. Serres tunnels pour les pépinières de riz irrigué conduit en repiquage | 96 |
| 2.4. Réduction de l'évaporation par des mulchs en culture pluviale..... | 101 |
| 3. Conclusion | 107 |

| | |
|--|------------|
| CHAPITRE 5 : DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION | 109 |
| 1. Rappel des partis pris méthodologiques et des principaux résultats | 109 |
| 2. Méthode employée..... | 110 |
| 3. Validité des résultats et leurs conséquences pour la problématique agricole..... | 114 |
| 4. Perspectives pour la recherche agricole | 116 |
| RÉFÉRENCES | 119 |
| ANNEXES | 128 |
| Annexe 1. Plan du dispositif | 129 |
| Annexe 2. Méthodes de mesure et d'échantillonnage sur le terrain | 135 |
| Annexe 3. Structure de la base de données | 139 |
| Annexe 4. Données observées sur le dispositif | 140 |
| Annexe 5. Résultats d'expérimentation virtuelle..... | 160 |

Table des illustrations

1. Liste de figures

Chapitre 1 :

| | |
|--|----|
| Figure 1: Zone montagneuse du Nord du Vietnam et localités étudiées..... | 17 |
| Figure 2: Précipitations et températures moyennes mensuelles pendant plus de 10 années pour les trois localités étudiées dans la zone montagneuse du Nord du Vietnam (PH : Phu Ho, VC : Van Chan, MCC : Mu Cang Chai)..... | 18 |
| Figure 3: Démarche générale. | 24 |
| Figure 4: Modèle agro-climatique conceptuel pour élaborer des scénarios de systèmes de culture de printemps adaptés aux conditions des vallées montagneuses du Nord du Vietnam..... | 25 |

Chapitre 2 :

| | |
|---|----|
| Figure 1: Monthly variation of (a) temperature and b) global radiation during spring season in 3 locations Phu Ho, Van Chan, and Mu Cang Chai. Mean over 10 years \pm standard deviation..... | 35 |
| Figure 2: Mean daily temperature (a) and global radiation (b) during spring season observed for the 4 crops studied in the experiment (dots) as compared to the climate of the Northern Mountains of Vietnam (whisker boxes). | 43 |
| Figure 3: Observed and simulated cycle length (in days) for a) rice at Phu Ho and Van Chan, b) aerobic rice, c) soybean and d) maize at Phu Ho. Solid lines are the 1:1 lines. | 46 |
| Figure 4: Observed (\square) and simulated LAI (—); observed (\bullet) and simulated biomass (— —); observed (\blacklozenge) and simulated grain yield (-----) of crops situations at Phu Ho for a) transplanted rice in 2011; b) directly sown irrigated rice in 2010; c) late sowing from 19-22 February 2011 for aerobic rice; d) late sowing from 19-22 February 2011 for soybean. | 47 |
| Figure 5: Effect of sowing date and elevation at Phu Ho on a) the probability P1 of reaching maturity before 5 July for maize, b) the probability P2 of avoiding lethally cold events for transplanted rice, and c) the probability P3 of achieving yield over 70% of maximum yield in growing situations for maize..... | 49 |
| Figure 6: Length of the sowing period related to elevation for the 4 crops studied at Phu Ho when a) the probability P1 for spring crop to reach maturity before 5 July > 80%, b) the probability P2 > 80%, and c) the probability P3 of achieving yield over 70% of maximum yield in the growing situations > 80%. | 50 |

| | |
|--|----|
| Figure 7: Length of favourable window for sowing (sowing period during which P1, P2 and P3 are over 80%, in days) related to elevation at a) Phu Ho; b) Van Chan; and c) Mu Cang Chai..... | 53 |
|--|----|

Chapitre 3 :

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Répartition annuelle des précipitations moyennes observées sur le dispositif expérimental du 1er février au 30 juin pour les trois sites étudiés : Phu Ho, Van Chan, Mu Cang Chai (à gauche, boîtes à moustaches). Pluviométrie du semis à la maturité pour chaque situation culturale établie dans le dispositif au cours des deux années et par espèce cultivée : riz aérobie, soja, maïs (à droite, o)..... | 69 |
| Figure 2: Evaluation du composant de WaTRYSim simulant la levée en fonction de la température et de la teneur en eau de la couche supérieure du sol. a) Comparaison des dates de levées simulées et observées (9 situations culturales pour le riz aérobie, 11 pour le soja et 11 pour le maïs). b) Distribution des résidus (écarts entre les valeurs simulées et observées de la durée entre semis et levée) en fonction de la durée observée entre semis et levée. La limite en pointillés indique les écarts compris entre -1 et +1 jour. La ligne verticale indique une durée de semis à levée supérieure à 19 jours..... | 70 |
| Figure 3: Comparaison du stock en eau du sol disponible (0-100 cm), simulé et mesuré en 2011 dans toutes les parcelles expérimentales des trois cultures pluviales pour les modalités sol non compacté (◇) et sol compacté à 40 cm de profondeur (▲). a) Relation entre le stock hydrique observé et simulé ($R^2 = 0.843$) ; b) Distribution des résidus (écarts entre les valeurs simulées et observées du stock hydrique) en fonction du stock hydrique mesuré..... | 71 |
| Figure 4: Stocks hydriques utiles simulés et observés (0 – 100 cm) à la deuxième date de semis DS2 (8-10 février) en 2011 pour les deux sites (Phu Ho et Suoi Giang). a) Riz aérobie à Suoi Giang. b) Riz aérobie à Phu Ho. c) Soja à Suoi Giang. d) Soja à Phu Ho. e) Maïs à Suoi Giang. f) Maïs à Phu Ho. | 72 |
| Figure 5: Probabilité Q1 d'atteindre la maturité avant le 5 juillet à Van Chan en fonction de la date de semis et de l'altitude, simulées avec WaTRYSim. a) Riz aérobie. b) Soja. c) Maïs. | 76 |
| Figure 6: Probabilité Q2 d'obtenir un rendement simulé excédant 0.7 fois le rendement maximal simulé. a) Riz aérobie à Mu Cang Chai, b) Soja à Van Chan, c) Maïs à Phu Ho. S1 : type de sol sans plancher limitant la descente des racines ; S2 : type de sol avec plancher imperméable à 40 cm de profondeur limitant la descente des racines. | 78 |

| | |
|---|----|
| Figure 7: Durée de la période favorable (probabilités Q1 et Q2 simultanément supérieures à 80 %) pour semer les cultures étudiées. a) Phu Ho, b) Van Chan, c) Mu Cang Chai. | 79 |
| Figure 8: Comparaison des probabilités d'atteindre la maturité de la culture avant le 5 juillet selon que l'on considère que l'eau n'est pas (colonne de gauche, probabilité P1, voir chapitre précédent) ou est (colonne de droite, probabilité Q1) limitante pour trois exemples de combinaisons de régions climatiques et de cultures a) riz aérobie à Mu Cang Chai, b) soja à Van Chan, c) maïs à Phu Ho. | 83 |
| Figure 9 : Comparaison des probabilités d'obtenir un rendement simulé supérieur à 0.7 fois le rendement maximum, dans le cas d'un sol sans obstacle à la descente en profondeur des racines, selon que l'on considère que l'eau n'est pas (colonne de gauche, probabilité P3, voir chapitre précédent) ou est (colonne de droite, probabilité Q2) limitante pour trois exemples de combinaisons de régions climatiques et de cultures a) riz aérobie à Mu Cang Chai, b) soja à Van Chan, c) maïs à Phu Ho. | 84 |
| Figure 10 : Comparaison de la durée de la période de semis favorable selon que l'on considère que l'eau n'est pas (résultats du chapitre 2, colonne de gauche) ou est (résultats du chapitre 3, colonne de droite) limitante pour des combinaisons d'altitude et de cultures à : a) Phu Ho, b) Van Chan, c) Mu Cang Chai. | 86 |

Chapitre 4 :

| | |
|---|----|
| Figure 1. Sensibilité de la fenêtre de semis favorable du riz irrigué à Phu Ho 400m d'altitude à des variations de paramètres du modèle de -20% à +20% autour de leurs valeurs nominales. | 90 |
| Figure 2. Sensibilité de la taille en jours fenêtre de semis favorable du soja à 0m d'altitude à des variations de paramètres du modèle de -20% à +20% autour de leurs valeurs nominales..... | 92 |
| Figure 3. Taille de la fenêtre favorable aux semis en fonction de la dose totale d'irrigation apporté en un nombre n d'irrigations de 20 mm pratiquées de 7 jours en 7 jours depuis le semis, n variant de 0 à 15. | 95 |
| Figure 4. Valeurs observées et estimées sous serre tunnel des températures moyennes (28 jours d'observation) : a) Régression avec ordonnée fixée à l'origine ($R^2=0.98$; RMSE = 0.96°C, RRMSE = 0.07), et (b) comparaison des évolutions au cours du temps. T0_Obs : mesure sous serre ; T0sim, valeur calculée avec le modèle empirique. | 97 |

| | |
|--|-----|
| Figure 5. Probabilités P2 d'éviter la destruction de la culture de riz repiqué par le froid (i) sans et (ii) avec serre-tunnel en plastique pour la pépinière a) à Phu Ho ; b) à Van Chan ; c) à Mu Cang Chai..... | 99 |
| Figure 6. Probabilités (P1) que la maturité du riz repiqué intervienne avant le 5 juillet de récolte le riz repiqué i) sans et (ii) avec recours à la serre tunnel. a) à Phu Ho ; b) à Van Chan ; c) à Mu Cang Chai..... | 100 |
| Figure 7 : Durée des fenêtres de dates de semis favorables pour le riz irrigué repiqué la pour les trois localités étudiées a) sans et b) avec recours à la serre tunnel pour la pépinière. | 101 |
| Figure 8 : Influence simulée d'un mulch (3t/ha de paille de riz et mulch plastique théorique (« nylon ») sur la durée de levée d'un maïs : a) Van Chan 600m ; b) Phu Ho 600m | 102 |
| Figure 9 : Influence simulée d'un mulch (3t/ha de paille de riz et mulch plastique théorique) pour la probabilité Q1 (récolte avant le 5 juillet) d'un maïs sous le climat de Van Chan 600m et Phu Ho 600m..... | 103 |
| Figure 10 : Influence simulée d'un mulch (3t/ha de paille de riz et plastique) pour la probabilité Q3 que le rendement dépasse 70% du rendement maximal d'un maïs sous le climat de Van Chan 600m et Phu Ho 600m | 103 |
| Figure 11 : Influence du mulch sur la durée de la période favorable (probabilités Q1 et Q3 simultanément supérieures à 80 %) pour semer le maïs. a) Phu Ho, b) Van Chan, c) Mu Cang Chai..... | 104 |

Chapitre 5 :

| | |
|---|-----|
| Figure 1: Rappel de la démarche générale exposée au chapitre 1..... | 110 |
|---|-----|

2. Liste de tableaux

Chapitre 1 :

| | |
|---|----|
| Tableau 1: Utilisation de la surface de rizière en zone montagneuse du Nord du Vietnam en 2005*..... | 20 |
| Tableau 2: Résumé des critères de probabilité pour la mise en place une culture de printemps dans les montagnes du Nord du Vietnam..... | 31 |

Chapitre 2 :

| | |
|--|----|
| Table 1: Values of the parameters used in the TRYsim model..... | 39 |
| Table 2: Calibrated Thermal Constants (TC, in degree days) at the main stages of the 4 crops studied. | 45 |
| Table 3: Maximum LAI, average biomass at harvest and average grain yield simulated by the model at Phu Ho for aerobic rice, soybean and maize and at two locations (Phu Ho and Van Chan) in irrigated rice growing situations..... | 48 |

Chapitre 3 :

| | |
|---|----|
| Tableau 1: Combinaisons possibles pour les expérimentations virtuelles considérées. | 67 |
| Tableau 2 : Principales caractéristiques des sols des deux sites (Nord Vietnam). | 68 |
| Tableau 3: Erreur relative de la simulation de LAI maximal, biomasse à la récolte et rendement en grains simulés par le modèle calé à partir de valeurs observées des trois cultures sur les deux sites expérimentaux. RMSE (root mean squared error) et RRMSE (relative root mean squared error). | 73 |
| Tableau 4: Valeur des paramètres ajustés pour le modèle WaSTRYSim..... | 74 |

Chapitre 4 :

| | |
|---|-----|
| Tableau 1. Evaporation accumulée pendant la durée du cycle de maïs sous différentes modalités : mulch paille, mulch nylon et sans mulch | 106 |
| Tableau 2. Synthèse des possibilités de réduire la contrainte climatique par le système de culture..... | 109 |

Abréviations et Sigles

Organismes :

| | |
|-----------|---|
| CIRAD : | Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement |
| NOMAFSI : | Northern Mountainous Agriculture and Forestry Science Institute |
| VAAS : | Vietnam Academy of Agricultural Sciences |
| SFRI : | Soils and Fertilizers Research Institute |

Localités d'étude :

| | |
|----------|--|
| PH : | Phu Ho, colline, province de Phu Tho |
| VC : | Van Chan, zone montagneuse, province de Yen Bai |
| MCC : | Mu Cang Chai, zone de très haute montagne, province de Yen Bai |
| SG : | Suoi Giang, zone montagneuse, district de Van Chan |
| PHA : | Zone A d'expérimentation au NOMAFSI |
| PHB : | Zone B d'expérimentation au NOMAFSI |
| SG 300 : | Zone d'expérimentation à Suoi Giang 300 m d'altitude |
| SG 600 : | Zone d'expérimentation à Suoi Giang 600 m d'altitude |
| SG 800 : | Zone d'expérimentation à Suoi Giang 800 m d'altitude |

Critères d'évaluation les scénarios:

| | |
|----|--|
| P1 | Probabilité que la date de maturité de la culture de printemps simulée soit antérieure au 5 juillet dans la condition potentiel de l'eau (TRYsim) |
| P2 | Probabilité que la culture ne soit pas compromise par le froid dans la condition potentiel de l'eau (TRYsim) |
| P3 | Probabilité que le rendement simulé atteigne au moins 0.7 fois la valeur maximale du rendement simulé dans la condition potentiel de l'eau (TRYsim) |
| Q1 | Probabilité que la date de maturité de la culture de printemps simulée soit antérieure au 5 juillet dans la condition limitant de l'eau (WaTRYsim) |
| Q2 | Probabilité que le rendement simulé atteigne au moins 0.7 fois la valeur maximale du rendement simulé dans la condition limitant de l'eau (WaTRYsim) |

Liste des paramètres du modèle (TRYSim et WaTRYSim)

| Nom du Paramètre | Description |
|------------------------|---|
| Tdmin | Minimum de température pour le développement (°C) |
| Tdmax | Maximum de température pour le développement (°C) |
| Tcmin | Température base de la conversion de lumière en biomasse (°C) |
| tcmax | Température maximale de la conversion de lumière en biomasse (°C) |
| tcopt | Température optimale de la conversion de lumière en biomasse (°C) |
| Tcold | Température seuil de sensibilité au froid (°C) |
| NDieCold | Nombre maximal de jours inférieurs à Tcold supportable par la culture sans mortalité |
| Kext | Coefficient d'extinction du rayonnement |
| dLAI _{max} | Vitesse de croissance maximale de la surface foliaire d'une plante par degré ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) |
| LAI _{mat} | LAI résiduel à maturité |
| E _{bmax} | Coefficient de conversion maximale du rayonnement |
| H _{lmax} | Indice de récolte maximal |
| P1 _{grainMax} | Poids maximal de 1 grain (g) |
| N _{grmax} | Nombre maximal de grains par plante |
| Vitircarb | Augmentation journalière de l'indice de récolte ($\text{gDM} \cdot \text{d}^{-1}$) |
| C _{grain} | Coefficient empirique de croissance journalière du nombre de grains pendant la durée de remplissage des grains, par unité de matière sèche produite à cette période (gMS^{-1}) |
| C _{grainv0} | Nombre de grains mis en place si croissance nulle pendant la durée de remplissage des grains ($\text{grains} \cdot \text{m}^{-2}$) |
| K _{max} | Coefficient cultural maximal (avec ETP Penman) |
| Pfactor | Seuil d'action de la contrainte hydrique sur la transpiration |
| SeuilTurg | Seuil d'effet de la contrainte hydrique sur la croissance du LAI |
| SeuilWS | Seuil d'effet de la contrainte hydrique sur la croissance de la biomasse |
| DeltaRacMax | Croissance du front racinaire par unité de temps thermique ($\text{cm}/^\circ\text{Cjour}$) |
| Z _{racmax} | Cote maximale atteignable par les racines (m) |
| Z _{ger} | Epaisseur de l'horizon du sol considéré pour la levée (cm) |
| T _{ger} | Température de base pour la germination et levée (°C) |
| CTL | Constante thermique à la date de levée (degrés-jours) |
| a _{Ger} | Seuil de condition hydrique potentielle pour la germination |
| b _{Ger} | Seuil de contrainte hydrique de suspension de la germination |

Introduction générale

L'origine de cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une coopération entre le Cirad et la recherche agronomique Vietnamiennne sur le thème de l'intensification écologique dans les régions montagneuses du Nord du Vietnam. Cette coopération a débuté au milieu des années 1990. Au-delà des objectifs scientifiques et appliqués à l'agriculture, elle vise au renforcement des compétences vietnamiennes en recherche agronomique systémique aux différentes échelles de cette discipline. Ce type d'objectif est au cœur du mandat du Cirad. Pour ce dernier, il s'agissait aussi d'une opportunité de développer des recherches sur les méthodes de conception-évaluation des systèmes de culture dans un contexte particulièrement exigeant pour ces méthodes à cause de l'extrême diversité biophysique de ces montagnes tropicales.

Ces montagnes sont aussi assez fortement peuplées, et leur population est particulièrement pauvre comparée à celle des grandes villes et des grands deltas rizicoles du Mekong et du Fleuve Rouge, de telle sorte que les enjeux de développement y sont importants. Les enjeux environnementaux ne le sont pas moins. Elles sont vues depuis longtemps comme le château d'eau du pays et l'une de ses principales réserves de biodiversité. Cependant, elles sont soumises à une pression démographique qui continue de s'accroître alors qu'elle a été maîtrisée dans les zones de plaine, et que des dégradations spectaculaires de l'environnement y ont été constatées sous l'effet de cette pression. Les pouvoirs publics vietnamiens, conscients de ces enjeux, ont mis en place une politique ambitieuse de développement dans cette région. Dans certaines zones qui sont moins peuplées et où la ressource hydrique est rare, cette politique vise au maintien de systèmes de production relativement extensifs, essentiellement fondés sur l'élevage bovin viande exploitant de vastes parcours de montagne. Mais dans le reste du territoire, l'idée directrice est celle du « land sparing », c'est-à-dire l'intensification sur les terres les plus favorables, de manière à préserver les écosystèmes naturels sur le reste de l'espace. Ces terres favorables sont les terres irrigables principalement situées dans les vallées, parfois très larges mais aussi aménagées en terrasses sur les versants. Depuis deux décennies, l'intensification de la production sur ce compartiment du paysage a été réalisée essentiellement à travers l'amélioration des réseaux d'irrigation, le recours aux engrais minéraux et aux variétés améliorées notamment hybrides, en prenant soin de ne pas reproduire les abus d'usages des pesticides constatés après l'application de la « révolution verte » dans les deltas du Mékong et du Fleuve Rouge. Cela a été rendu possible par un investissement considérable dans les infrastructures de communication et de transport dans toute la région, et dans la construction de filières de mise à disposition d'intrants et de commercialisation du riz. Les rendements obtenus pour le riz irrigué ont augmenté de manière spectaculaire pour atteindre

aujourd'hui des niveaux très élevés comparables à ceux des grands deltas irrigués du pays. L'ambition affichée par le gouvernement est aujourd'hui de développer un nouveau cycle de culture, au printemps, précédant le cycle traditionnel de l'été. Cette option se heurte cependant à des contraintes de température et de précipitations extrêmement variables d'une année à l'autre et à travers le territoire.

Prenant prétexte de la question de l'évaluation de la faisabilité de cette culture de printemps en fonction de ces contraintes, le travail qui est rapporté ici développe une approche agro-climatique mobilisant modèle, expérimentation réelle et expérimentation virtuelle.

Dans un premier chapitre, la problématique est précisée, la démarche générale est formulée, puis le détail de la méthodologie est exposé. Dans les deux chapitres suivants, la démarche est appliquée successivement à deux grands cas : d'abord celui où l'irrigation est praticable au printemps, puis celui où la culture est à conduire en régime pluvial. Le quatrième chapitre récapitule brièvement les principaux résultats méthodologiques et appliqués puis les discute, et identifie les prolongements scientifiques et appliqués de la thèse.

Chapitre 1. Contexte, problématique, méthodologie

1. Contexte agricole

1.1. La zone montagneuse du Nord du Vietnam : un fort besoin de développement dans un environnement naturel très contraint

Au Vietnam, les grandes réformes politiques et économiques « Doi Moi » (renouveau) lancées en 1986 ont permis l'essor de ce pays. Le revenu annuel par habitant est ainsi passé de moins de 100 \$ en 1986 à 1 130 \$ en 2010. Le pourcentage de population pauvre a diminué de 58 % en 1993 à 14,5 % en 2008, et la plupart des indicateurs de bien-être ont été améliorés (The World Bank, 2012). Aujourd'hui, il reste néanmoins des zones de faible développement, notamment la zone montagneuse du Nord du Vietnam où la pauvreté est la plus élevée du pays, avec 29,4 % de familles au-dessous du seuil de pauvreté en 2010, c'est-à-dire avec un revenu mensuel par personne inférieur à 20 \$ (General statistics office, 2010). De ce fait, le gouvernement vietnamien met en priorité des actions d'intensification agricole de la zone montagneuse du Nord visant l'autosuffisance alimentaire des populations locales (Pandey et al., 2006; Bonnin and Turner, 2011).

1.2. Face au manque de surface agricole, le développement agricole passe par l'intensification de l'agriculture

La région montagneuse du Nord du Vietnam s'étend sur le tiers du pays et couvre 103 000 km² (figure 1). Avec 12 millions d'habitants, soit 15 % de la population du pays, cette région montagneuse est assez densément peuplée (116,5 habitants km⁻²) et le taux démographique annuel est actuellement de 1,27 % (General statistics office, 2010). Cette région comprend 15 provinces administratives (11 pour le Nord-Est et 4 pour le Nord-Ouest). Plus de la moitié des villages se situe en altitude, au-dessus de 600 m, et près de 40 % entre 200 et 600 m (Tran Duc Vien, 2003). Son développement fait face à de multiples contraintes biophysiques et humaines : fortes pentes, terrains accidentés, sols acides peu fertiles, difficulté d'accès aux terres, aux marchés et aux services publics, rares infrastructures, faible niveau d'éducation (Castella and Quang, 2002; Le Quoc Doanh and Luu Ngoc Quyen, 2007).

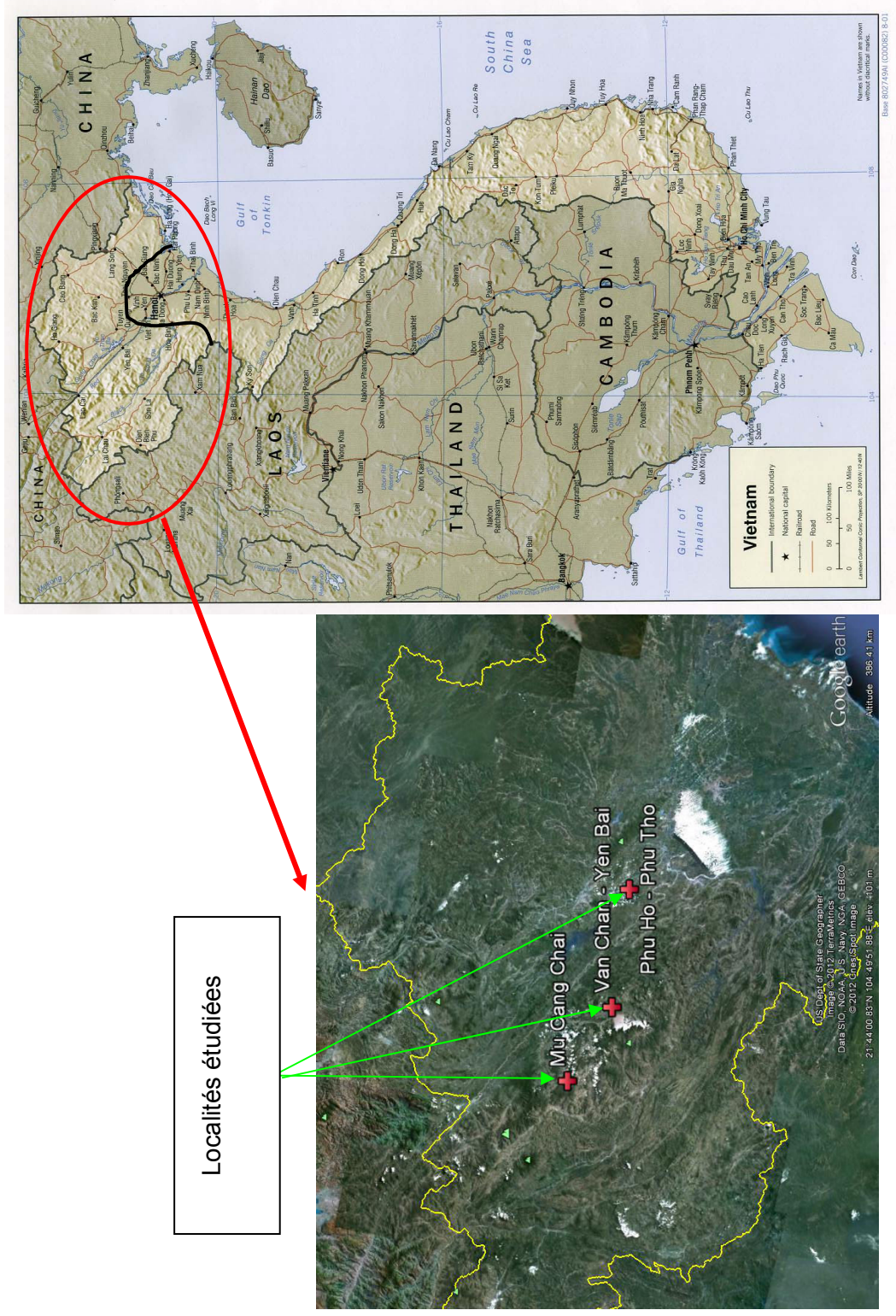


Figure 1: Zone montagneuse du Nord du Vietnam et localités étudiées.

Les vallées du Nord du Vietnam sont soumises à des conditions variées de température et de précipitation à cause de l'altitude et de l'exposition est ou ouest par rapport à la principale ligne de crête du relief. La pluviométrie annuelle est de 1 800 - 2 000 mm (Nguyen Thanh Son, 2005; Doan Van Diem et al., 2008). Le climat comprend deux saisons : l'été et le printemps. L'été, ou saison des pluies, de juin à octobre, fournit 68 % des précipitations annuelles, avec une température moyenne journalière de 25 à 32 °C (figure 2), c'est la saison favorable au riz irrigué, qui domine dans ces vallées et qui est cultivé entre 15 et 1 400 m d'altitude. Par contre, le printemps, de janvier à juin, est plus sec (28 % des précipitations annuelles) et plus froid, avec une température moyenne variant de 16 à 27 °C, et souvent inférieure à 20 °C au début de la saison (figure 2).

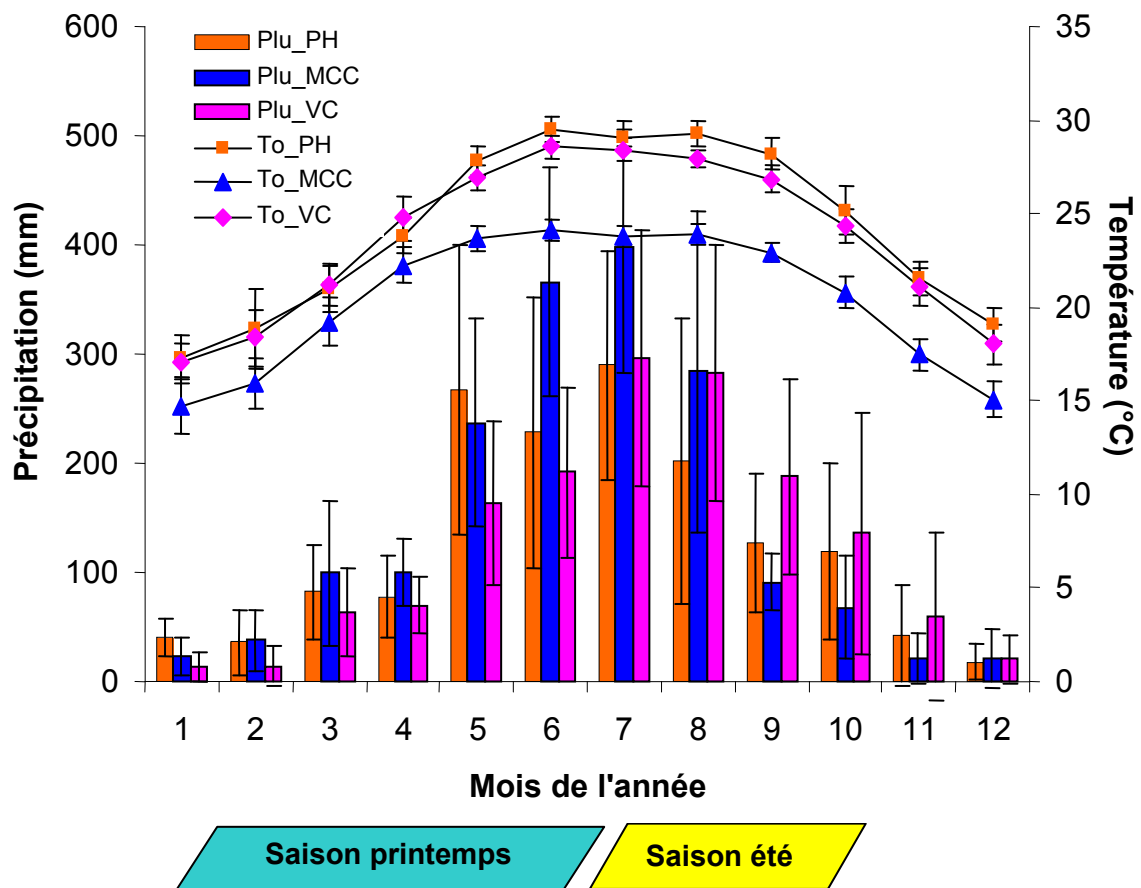


Figure 2: Précipitations et températures moyennes mensuelles pendant plus de 10 années pour les trois localités étudiées dans la zone montagneuse du Nord du Vietnam (PH : Phu Ho, VC : Van Chan, MCC : Mu Cang Chai).

Le paysage agricole dominant du Nord du Vietnam est une combinaison de terres agricoles dans les vallées et sur les pentes. Les terres des vallées sont habituellement

composées de rizières et terrasses intensivement cultivées avec le riz irrigué cultivé pendant la saison estivale. Les terres de pente sont pour la plupart cultivées en riz pluvial, maïs, manioc et portent aussi des vergers de fruitiers. En 2005, la superficie totale des terres agricoles était de 1 479 000 ha, incluant 524 600 ha de terres basses irrigables pour le riz (tableau 1), 451 900 ha de terres de cultures annuelles sur les pentes, et 341 700 ha de cultures pérennes (Ministry of Natural Resources and Environment of Vietnam, 2006). Mais l'exploitation agricole des pentes a causé de fortes dégradations environnementales. On a en effet assisté au cours de la seconde moitié du XX^e siècle à une extension des cultures sur les versants montagneux, aux dépens notamment de la forêt (Castella and Quang, 2002). Par ailleurs, on constate l'augmentation de la fréquence de divers phénomènes catastrophiques tels que des coulées de boues, des glissements de terrain et des inondations, augmentation attribuée par les pouvoirs publics au développement des cultures sur les pentes (Le Quoc Doanh et al., 2003). Cette régression de la forêt et l'augmentation des phénomènes d'érosion sont vues par les pouvoirs publics comme non seulement préoccupantes à l'échelle locale mais aussi comme susceptibles de bouleverser le fonctionnement hydrologique du bassin versant du Fleuve Rouge avec des conséquences potentiellement désastreuses sur la riziculture irriguée intensive du delta du fleuve. L'Etat a réagi à cette menace d'une part en créant systématiquement des réserves forestières interdites à la culture, en contrepartie de la politique de privatisation des terres qui constitue un des éléments clefs du « Doi Moi », et d'autre part en favorisant le développement de la riziculture intensive dans les bas fonds. Dans certaines régions de montagne, des séquences de photos aériennes et d'images satellitaires sur la période 1950 – 1998 ont permis de valider cette politique car on y observe, après une période de déforestation continue, un relatif retour de la forêt à partir des années 90, coïncidant avec la création de réserves forestières et l'intensification de la culture de riz irrigué de bas-fond (Castella et al., 2002). Ainsi, il est aujourd'hui considéré comme impossible ou en tout cas comme non souhaitable d'étendre la surface agricole dans ces zones de montagne (Pandey et al., 2006; Bonnin and Turner, 2011). L'intensification est donc privilégiée, comme moyen d'augmenter la production et le revenu de l'agriculture de cette région.

Depuis 1998, visant l'amélioration de l'usage des sols et leur préservation, le gouvernement vietnamien subventionne les intrants de la riziculture irriguée et intensive d'été dans les vallées avec des programmes spécifiques pour la zone montagneuse du Nord (notamment le « Programme 135 », puis « 143 »). Le gouvernement visant aussi l'autosuffisance alimentaire des populations du Nord du pays, il soutient également l'introduction d'un second cycle de culture au printemps, en plus du cycle principal estival. Dans le cadre de ce deuxième cycle de culture dans les terres basses, les cultures de riz hybride irrigué, de soja et de maïs, toutes deux irriguées ou pluviales selon la disponibilité en eau d'irrigation au printemps, sont encouragées afin de limiter la pression des cultures

annuelles, notamment du riz pluvial, sur les pentes montagneuses (Bonnin and Turner, 2011). Le concept de riz « aérobie », c'est-à-dire supportant des périodes où la rizière n'est pas inondée (Bouman et al., 2005), est également envisagé comme une option intéressante pour cette saison, bien que les variétés actuellement disponibles soient dotées d'une qualité de grain assez médiocre qui réduit la valeur commerciale de leur production. Cependant, dans de nombreuses communes, les efforts du gouvernement pour promouvoir la double culture n'ont pas été couronnés de succès, sans que les causes en soient clairement établies. C'est ainsi qu'en 2005, 36 % de la surface des rizières irrigables cultivées en été n'étaient toujours pas cultivées au printemps (tableau 1).

Tableau 1: Utilisation de la surface de rizière en zone montagneuse du Nord du Vietnam en 2005*.

| Région | Surface agricole (ha) | Surface de rizière (ha) | Surface de rizière cultivée seulement en été (une saison par an) (ha, %) |
|-------------------|--------------------------|----------------------------|---|
| Nord-Est | 979 000 | 390 100 | 148 600 (38 %) |
| Nord-Ouest | 500 000 | 134 500 | 38 500 (29 %) |
| <i>Total Nord</i> | <i>1 479 000</i> | <i>524 600</i> | <i>187 100 (36 %)</i> |

*Source: Ministry of natural resources and environment of Vietnam (2006) and Le Quoc Doanh et Luu Ngoc Quyen (2007).

1.3. Planter une culture de printemps dans les vallées impose de lever de lourdes contraintes climatiques

Dans une enquête effectuée par Le Quoc Doanh et Luu Ngoc Quyen (2007) en 2006 auprès des exploitations familiales, les agriculteurs ont souligné que le début de la saison de printemps est trop contraignant pour le second cycle de culture à cause du sol trop sec (40 % des familles interrogées) et de la température froide (25 % des familles interrogées).

Au printemps, les températures froides sont un facteur clé du ralentissement de la croissance des cultures, et même de mortalité élevée des plantules. Les températures moyennes minimales varient de 13,2 à 24,5 °C, et maximales de 19,7 à 31,2 °C. Le mois de janvier est le plus froid, avec une température moyenne en vallée de 16 °C, et inférieure à 13 °C en zone plus haute voire même au-dessous de 10 °C. La température froide peut détruire la culture au stade juvénile (Schleppi et al., 1990; Wang et al., 1997; Andaya and Mackill, 2003; Janowiak et al., 2003) ; par exemple, au début du printemps de 2011, il y a eu 30 jours avec une température inférieure à 15 °C, ce qui a provoqué la destruction de 70 000

ha de riz irrigué et 5 000 ha de pépinière de riz (VAAS, 2011). De plus, la température est le principal facteur qui régit le développement phénologique des cultivars non photosensibles comme le riz irrigué, le riz aérobie, le maïs et le soja utilisés au Nord du Vietnam. Ainsi, la durée entre la date de semis et la maturité se trouve rallongée avec des températures insuffisantes (Dingkuhn and Miezán, 1995; Rezaul, 1997).

La deuxième contrainte importante pour la culture de printemps est la disponibilité en eau. Pendant 5 mois, de janvier à juin, les précipitations de printemps atteignent en moyenne 457 à 863 mm selon les localités (10 ans de relevés ; figure 2), mais elles ont fortement varié, de 266 à 1 228 mm selon l'année et la localité (données non présentées). Au Japon, en riziculture tropicale aérobie, Katsura et al. (2010) a montré que la biomasse maximale de 17.2-18.5 t ha⁻¹ est atteinte avec 800 à 1 300 mm d'apport d'eau correctement réparti. Au Nord de la Chine, Bouman et al. (2006) ont obtenu une biomasse de 15-18.5 t .ha⁻¹ et un rendement de 5.3 à 5.7 t ha⁻¹ pour le cultivar de riz aérobie HD502 avec 640 à 920 mm d'eau. On sait qu'en conditions arides, le rendement d'une céréale n'atteint pas 50 % de son potentiel (Lobell et al., 2009). Les précipitations de printemps au Nord du Vietnam restent globalement inférieures à ces résultats, on peut donc s'attendre d'une part à un retard de levée, d'autre part à une réduction de la biomasse et du rendement.

La troisième contrainte qui influence l'accumulation de biomasse et le rendement en grains est le rayonnement solaire incident (Casanova et al., 1998). Le rayonnement moyen journalier de la zone montagneuse du Nord du Vietnam est relativement faible, toujours inférieur à 15 MJ m⁻² de janvier à avril, mais variant de 15 à 20 MJ m⁻² en été, entre mai et septembre (figure 1.b, chapitre 2) (Nguyen and Pryor, 1997). Singer et al. (2010) ont calculé une moyenne cumulative de PAR (photosynthetically active radiation) intercepté par la culture de printemps de 575 MJ m⁻² pour le soja et 687 MJ m⁻² pour le maïs. De leur côté, Katsura et al. (2008; 2010) ont obtenu un PAR de 950-1 270 MJ m⁻² pour le riz avec une biomasse 14-19 t ha⁻¹. En zone montagneuse du Nord du Vietnam, nous sommes donc là aussi en situation contraignante pour la culture de printemps.

En conclusion, la durée du cycle de culture de printemps est allongée par la température et les éventuelles difficultés de levée due à la faiblesse des précipitations, et le rendement est limité par la température, les précipitations et le rayonnement global. Par ailleurs, l'organisation du système de production impose des contraintes pour les dates d'implantation et de récolte de la culture de printemps, liées au déroulement de la culture de riz d'été qui assure un rôle prépondérant dans l'économie des ménages agricoles (Castella and Quang, 2002). D'une manière générale, la période exploitable pour une culture de printemps commence « au plus tôt » à la fin du riz d'été précédent et se termine « au plus tard » au début du riz d'été qui fait suite. Ces dates sont approximativement connues par les populations locales et peuvent être affinées en fonction de la localité par la modélisation

agro-climatique. A titre indicatif, elle peut être implantée au plus tôt le 10 janvier. Elle doit cependant être récoltée au plus tard le 5 juillet car la culture d'été de riz irrigué est lancée fin juin, avec un repiquage au plus tard le 10-15 juillet (Le Quoc Doanh and Luu Ngoc Quyen, 2007). Entre les deux cycles de culture, les agriculteurs ont en effet besoin de 5 à 10 jours, d'une part pour assurer les activités post-récolte des cultures de printemps, d'autre part pour préparer le sol de la culture d'été.

2. Problématique

Face à cet ensemble de contraintes et dans l'objectif de répondre aux difficultés des agriculteurs à implanter une culture de printemps qui précède l'habituelle culture d'été, notre but a été d'une part de mieux comprendre les contraintes biophysiques qui pourraient limiter cette forme d'intensification de l'agriculture, et, d'autre part, d'identifier des techniques agricoles qui pourraient réduire ces contraintes.

L'objectif de la thèse découle de cette problématique et est exprimé comme suit :

Il s'agit d'évaluer sur le plan agro-climatique les options de réalisation d'une culture de printemps dans les hautes vallées du Nord du Vietnam en fonction des caractéristiques variétales des espèces cultivées envisagées (riz irrigué, riz aérobie, soja, maïs). Cette évaluation conduira notamment à déterminer les dates de semis pour lesquelles les conditions hydriques, thermiques et de rayonnement permettront un développement optimal de la plante et une récolte au plus tard le 5 juillet, date la plus tardive à laquelle le riz d'été doit être repiqué ou semé.

Compte tenu de la complexité de la contrainte climatique, l'approche par la modélisation agro-climatique est la plus adaptée à notre problématique. Toutefois, les données disponibles sont insuffisantes pour simuler les situations culturales nouvelles. De ce fait, nous calibrerons le modèle à partir des résultats obtenus sur les expérimentations agronomiques que nous conduirons sur le terrain. Nous simulerons seulement ensuite des scénarios cultureux contraints par les conditions climatiques au printemps. Ces scénarios cultureux nous permettront d'une part d'estimer la croissance et le développement des cultures dans les conditions climatiques locales, et d'autre part, de déterminer les contraintes auxquelles fera face le système de culture. Enfin, il nous sera possible de proposer aux services agricoles de la région et aux agriculteurs différentes modalités d'introduction d'une culture de printemps dans les vallées.

3. Démarche générale

La démarche générale qui a été appliquée pour traiter de cette problématique combine différentes étapes (figure 3).

Dans un premier temps, à partir de la problématique qui vient d'être identifiée, seront formulées un certain nombre d'hypothèses sur l'interaction entre le climat et la culture de printemps. Ces hypothèses seront formulées notamment sous la forme d'un modèle conceptuel des interactions entre le climat et la culture de printemps. Dans un second temps, à partir de ce modèle conceptuel, sera mise en œuvre une étape de modélisation, consistant d'une part à écrire le modèle agroclimatique sous ses formes mathématiques et informatiques, et, d'autre part, à définir le dispositif expérimental permettant de paramétrer ce modèle et de le confronter à des situations agricoles réelles. Dans une troisième étape, le modèle agroclimatique sera appliqué à une expérimentation virtuelle, de manière à étendre le dispositif expérimental à des conditions de climat représentatives des montagnes du Nord du Vietnam dans leur variabilité spatiale et temporelle. Cette expérimentation virtuelle permettra d'apporter un certain nombre de réponses au problème agricole identifié, avec des éléments de discussion sur la portée et les limites de ces réponses.

Dans le cas de la présente thèse, cette démarche générale sera répétée deux fois : dans le chapitre 2, elle sera appliquée au cas où l'on fait l'hypothèse, applicable à une part significative des terres irrigables des montagnes du Vietnam, que l'eau n'est pas limitante pour la culture de printemps. Dans le chapitre 3, la démarche sera reproduite pour le cas où les cultures de printemps seraient conduites en régime exclusivement pluvial.

Une discussion générale des résultats et de cette démarche fera l'objet du chapitre 4.

Dans la prochaine section du présent chapitre 1, cette démarche générale sera détaillée pour tous les éléments communs à ses applications des chapitres 2 et 3.

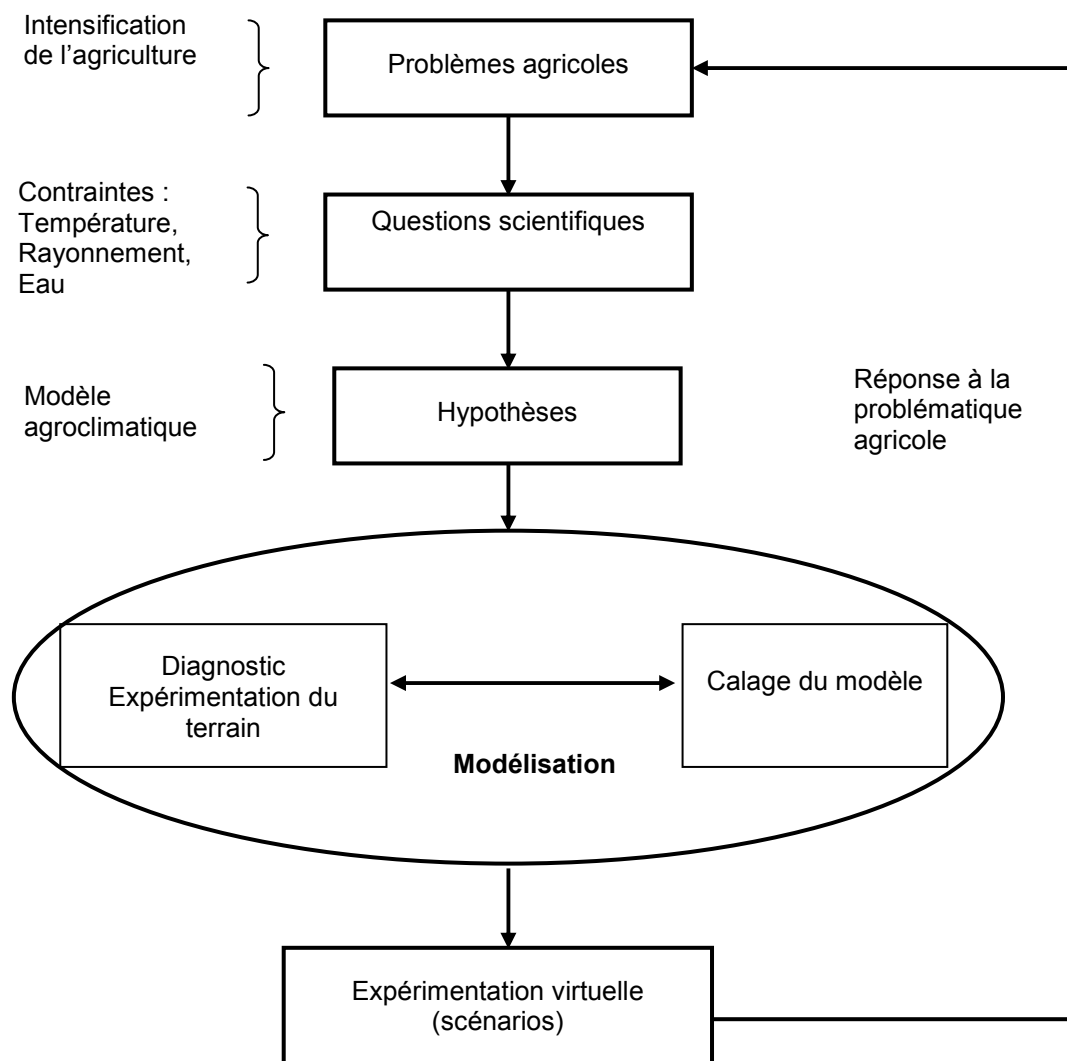


Figure 3: Démarche générale.

4. Méthodologie : modèle agro-climatique et démarche expérimentale

4.1. Choix des localités et définitions des variables du modèle agro-climatique

Nous avons choisi trois localités contrastées du point de vue climatique au printemps à altitude équivalente, pour lesquelles nous disposons de séries historiques de données météorologiques de 10 années et plus, correspondant aux modalités suivantes du climat du Nord du Vietnam :

- « plus chaud-humide », Mu Cang Chai 1 000 m (N 21°51' ; E 104°5') ;
- « températures intermédiaires -sec », Van Chan 300 m (N 21°34' ; E 104°31') ;
- « plus froid-humide » Phu Ho 35 m (N 21°27' ; E 105°14').

Mu Cang Chai est la zone Nord-Ouest, Phu Ho est dans la zone Nord-Est, et Van Chan est situé entre ces deux zones (figure 1).

Pour la simulation de systèmes de culture de printemps adaptés aux vallées de la région, nous avons d'abord élaboré un modèle conceptuel agro-climatique (figure 4), dont les facteurs sont des variables climatiques, des variables de sol, les caractéristiques des variétés cultivées et des techniques de culture.

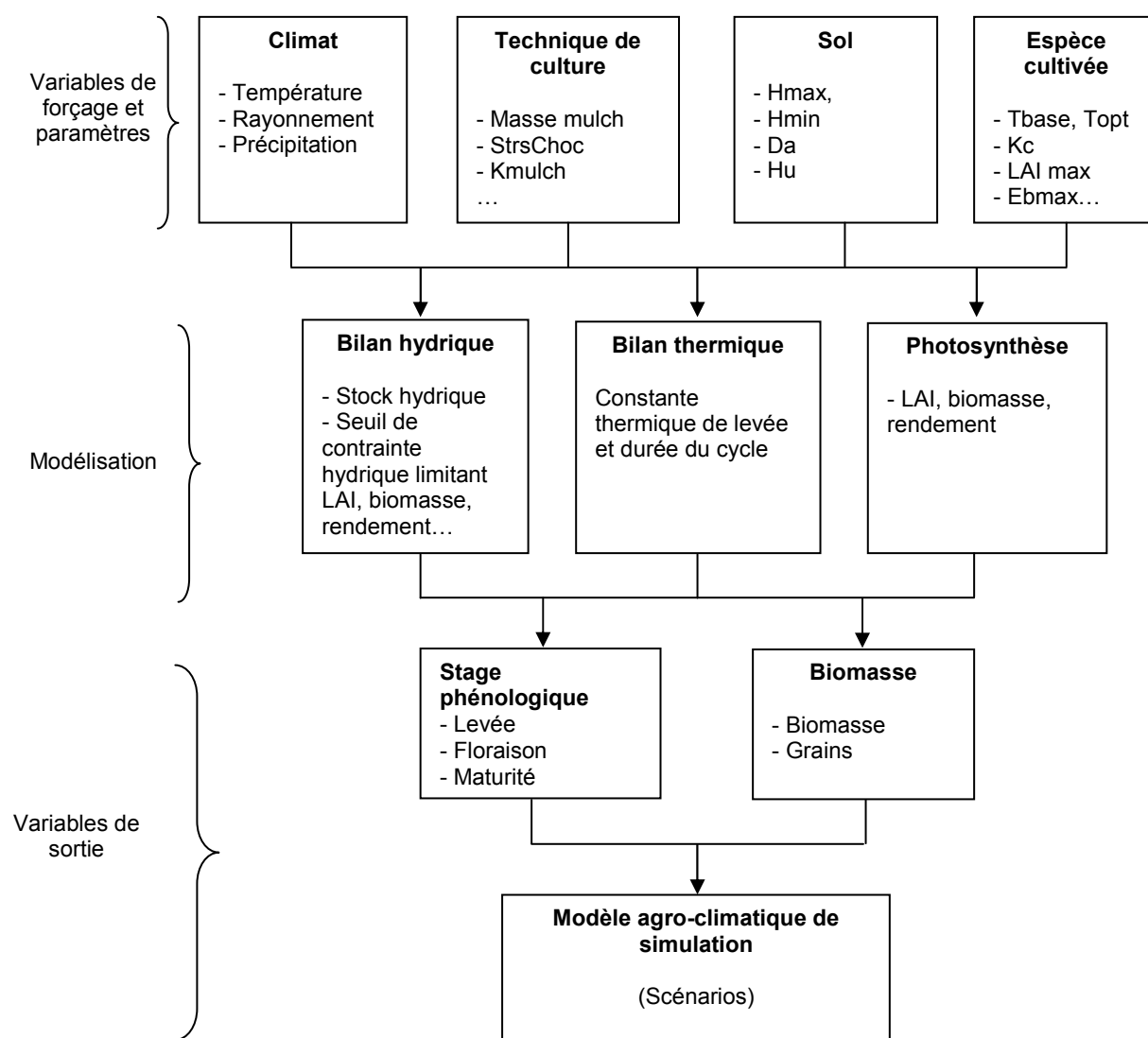


Figure 4: Modèle agro-climatique conceptuel pour élaborer des scénarios de systèmes de culture de printemps adaptés aux conditions des vallées montagneuses du Nord du Vietnam.

Ensuite, un modèle agro-climatique a été écrit sous sa forme mathématique et informatique, en utilisant VBasic pour Microsoft Access, de manière à faciliter les expérimentations virtuelles en suivant les principes d'interfaçage entre modèles et bases de données tels que décrits par Affholder et al. (2012). Le modèle a été construit suivant les lignes directrices proposées par Sinclair et Seligman (1996), et en empruntant largement aux modèles déjà existants, tout particulièrement STICS par Brisson et al. (2002), Cropwat par Smith et al. (1993), SarraH par Dingkuhn (2003), et Oryza par Bouman et al. (2001). Nous

avons utilisé autant que possible des relations simples et des composants de modèle qui ont fait preuve de robustesse après de nombreux tests dans divers environnements, y compris les environnements et cultures similaires à ceux de la présente étude.

4.2. Matériels et méthodes des dispositifs expérimentaux de terrain

Notre modèle a été calé grâce à des dispositifs expérimentaux conduits au printemps pendant deux années (2010, 2011) sur les sites de Suoi Giang à 800 m d'altitude et Phu Ho. Le site de Suoi Giang est particulièrement représentatif des situations agricoles de montagne car il couvre une toposéquence incluant le domaine irrigué de vallée, à 200 m d'altitude, et des terrasses irrigables chaque année en été mais certaines années seulement au printemps, aménagées sur un versant et s'étageant de 400 à 1100 m d'altitude. Aucun dispositif expérimental n'avait été mis en place sur ce site et le dispositif que nous y avons implanté était entièrement situé en parcelles d'agriculteurs, avec les difficultés que cela comporte en termes de compromis à établir entre les objectifs scientifiques des expérimentations et les objectifs et contraintes des producteurs dans leurs parcelles. De plus, ce site était relativement difficile d'accès ce qui limitait l'intensité des mesures que nous pouvions y envisager. Le site de Phu Ho est situé au siège du NOMAFSI et l'on y disposait de toute l'infrastructure nécessaire à un effort de mesure plus intense. Les expérimentations ont été réalisées pour les quatre cultures principalement envisagées par les pouvoirs publics comme options pour la culture de printemps (le riz irrigué, le soja, le maïs, et le riz aérobie). Les cultivars choisis pour ces expérimentations étaient les cultivars considérés actuellement comme les mieux adaptés à la saison de printemps selon les résultats de Le Quoc Doanh et Luu Ngoc Quyen (2007). Il s'agissait des cultivars de riz irrigué Nhi uu 838 (Hybride F1), du riz aérobie IR74371, du soja DT84, et du maïs LVN99 (Hybride F1).

Dans chaque site on disposait d'une station météorologique automatique (CIMEL) fournissant les valeurs minimales, maximales et moyennes journalières de la température de l'air, ainsi que le cumul journalier du rayonnement global et la précipitation journalière. Des thermomètres enregistreurs (Votcraft DL-120) ont également été mis en place sous abri ventilé à proximité immédiate de chaque site du dispositif, et dans les serres tunnels de pépinière du riz.

a/ Traitements

Trois types de traitements ont été conduits et sont décrits ci-après. Chaque situation culturale engendrée était répétée trois fois en parcelles élémentaires de 15 à 30 m². L'agencement des parcelles élémentaires formait chaque année un dispositif en bloc randomisé pour chaque culture, à trois répétitions pour le facteur date de semis dans l'année.

Traitements « développement et croissance potentielle des cultures » : ces expérimentations ont été conduites sur les terrains et comprenaient des situations cultivées avec les quatre espèces en l'absence de tout stress, en jouant sur les dates de semis, sur l'année d'expérimentation et sur la localisation, pour caler la composante du modèle simulant le développement et la croissance des cultures en conditions potentielles. La conduite de ces essais visait à éliminer tout facteur limitant par une fertilisation et des apports d'eau élevés, des désherbages méticuleux et répétés, une surveillance phytosanitaire régulière. Ces traitements ont été conduits au printemps en 2010 avec les quatre cultures en condition hydrique non limitante. Des essais supplémentaires de riz irrigué ont également été conduits en modifiant les techniques culturales : semis direct, repiquage avec ou sans serres tunnel, sur les sites de Phu Ho zone A (PHA) et Suoi Giang (300, 600 et 800 m d'altitude). Pour les essais de cultures pluviales conduits à Phu Ho, les trois dates de semis testées ont été une date précoce au 28-30 janvier (DS1), un semis intermédiaire au 8-10 février (DS2) et un semis tardif au 19-22 février (DS3). En 2011, ces traitements ont été conduits seulement avec le riz irrigué avec en plus un traitement de repiquage des plantules de riz à 5 âges différents (10, 15, 20, 25, 30 jours).

Traitements « croissance en conditions variées d'alimentation hydrique » : ces traitements ont été appliqués aux cultures pratiquées en régime pluvial, c'est-à-dire le riz « aérobie », le soja et le maïs. Les conditions d'alimentation hydrique variées ont été obtenues par effet de la localisation (Phu Ho et Suoi Giang), en jouant sur la date de semis (DS1, DS2, DS3), et par contrôle de l'eau d'irrigation, de manière notamment à garantir la survie des plantes en cas de pluviométrie trop faible. Les parcelles définies au paragraphe précédent ont constitué la modalité « alimentation hydrique non limitante » du facteur alimentation hydrique. Les essais suivants ont été effectués en 2010 à Phu Ho zone B (PHB, sur une zone exondée toute l'année), répété en 2011 avec 2 dates de semis (DS2 et DS3). En 2011, l'essai avec 2 dates de semis (DS1 et DS2) a aussi été réalisé à Suoi Giang (altitude 800 m).

Traitements « techniques culturales » : ce traitement a été conduit sur le riz, trois techniques de culture ont été appliquées : semis direct en plein champ des graines de riz prégermées (modalité « semis au champ ») ; repiquage des plantules semées sans recours aux serres tunnels en plastique ; repiquage des plantules semées sous serres tunnels en plastique. Ce traitement a été réalisé à Phu Ho (PHA) les deux années et répété à Suoi Giang (300, 600 et 800 m d'altitude) en 2010.

Dans toute l'expérimentation, les parcelles faisaient l'objet de désherbages méticuleux et répétés, et d'une surveillance phytosanitaire régulière. Pour le riz irrigué et riz aérobie, la fertilisation N-P-K était de 100-100-80 avec 10 t/ha de fumier. Pour le soja, elle était de 30-60-60 et 8 t/ha de fumier, et pour le maïs de 160-90-90 avec 10 t/ha de fumier.

b/ Mesures et observations sur les plantes

Les stades phénologiques ont été observés par notation tous les 3 jours pour chaque parcelle élémentaire à Suoi Giang et tous les jours à Phu Ho. Le LAI (Leaf Area Index) a été mesuré à l'aide du LICOR-2000 tous les 10-12 jours à Phu Ho et 15-20 jours à Suoi Giang dans toutes les parcelles élémentaires au même endroit de la parcelle pendant tout le temps du cycle de culture.

En 2010 deux mesures de biomasse ont été effectuées au stade floraison et à la récolte pour toutes les parcelles élémentaires. En 2011, les mesures ont été effectuées à cinq stades : premier tallé visible, début de floraison, floraison en plein, remplissage des grains et maturité. A chaque mesure par parcelle élémentaire, un échantillon de 5 plantes choisies au hasard a été prélevé dans des zones des parcelles réservées aux mesures destructives. Ces échantillons étaient séchés dans une étuve à 80 °C pendant 48 h avant d'être pesés.

A la récolte, la biomasse totale et les composantes du rendement ont été mesurées pour chaque parcelle élémentaire ; un échantillon a été pris sur 1 m² pour le riz irrigué et aérobie, et sur 3 m² pour le soja et le maïs.

c/ Mesures dans le sol

L'humidité pondérale du sol (% Ws) a été mesurée par prélèvement de sol à la tarière avec une fréquence de 15 jours jusqu'à la phase remplissage du grain. Les prélèvements ont été effectués tous les 20 cm jusqu'à 100 cm. Pour chaque intervalle de profondeur, le sol prélevé était mélangé pour obtenir un échantillon homogène, représentatif de l'humidité dans cette tranche. Les échantillons ont été conservés dans des boîtes soigneusement fermées. Au laboratoire, ils ont été pesés puis placés à l'étuve pour séchage à 105 °C pendant 48 h. L'humidité du sol a été définie par le rapport de la masse de la phase liquide à celle de la phase solide (Musy, 2005).

L'humidité du sol au point de flétrissement (g eau/g sol, Hmin) a été estimée en utilisant la valeur la plus faible de la teneur en eau du sol pour chaque profondeur au cours de l'ensemble de la période de mesure.

La capacité au champ (Hcc) a été mesurée par la méthode conventionnelle du double anneau de Klimet Smith (SFRI, 1998). Les deux anneaux en fer (diamètre anneau externe : 15 cm ; diamètre anneau interne : 12 cm ; hauteur de deux anneaux : 25 cm) ont été placés à 5 cm de profondeur du sol. De l'eau était introduite 9 ou 10 fois dans les deux anneaux jusqu'à saturer le sol (lorsque l'eau n'était plus filtrée), de l'eau a été ajoutée une dernière fois jusqu'à la surface d'anneau. Après 24 h, nous avons prélevé le sol à la tarière (de 0 à 1 m de profondeur) et mesuré l'humidité du sol. Pour chaque site, nous avons effectué deux répétitions distantes de 100 m.

La densité apparente du sol a été mesurée par prélèvement de sol avec un cylindre de 100 cm³ de 5 à 100 cm de profondeur. Les échantillons ont été séchés à l'étuve à 80 °C pendant 48 h puis pesés. La densité apparente du sol (d) a été calculée par l'équation :

$$d = M_s/V_s \text{ (} M_s \text{ : masse du sol sec, en g, } V_s \text{ : volume du sol, en cm}^3\text{)}.$$

4.3. Etapes de construction et d'utilisation de notre modèle agro-climatique

Une première version du modèle agroclimatique a été élaborée pour le cas où l'eau n'est pas limitante. Ce modèle a été baptisé TRYsim (Temperature and Radiation determined Yield Simulator). TRYsim simule au pas de temps journalier la durée du cycle et les rendements en biomasse et grain des cultures étudiées. La germination et la levée ne sont pas simulées et la date de levée doit être fournie en paramètre. Cette configuration correspond au cas, pratiquement systématique dans les terres irriguées au Vietnam, d'un semis à très faible profondeur de graines prégermées. Nous avons considéré une durée constante de quelques jours, pour chaque espèce, entre le semis et la levée. Le modèle comprend une composante de calcul du développement et de l'évolution au cours du temps du LAI en fonction du temps thermique, impliquant des paramètres variétaux tels que les constantes thermiques caractéristiques de chaque phase de développement, et la température-base de développement. TRYsim simule également la mort de la culture sous l'effet de températures froides de l'air pendant plusieurs jours consécutifs. Cette première version du modèle a ensuite été calée en utilisant les données observées au cours des expérimentations de terrain en conditions hydriques optimales.

Par la suite, le modèle TRYsim a été utilisé pour comparer et évaluer les performances agronomiques des cultures pour divers scénarios d'introduction de la culture de printemps. Pour cela, nous avons appliqué le modèle aux séries climatiques de longue durée (10 années) correspondant aux trois localités étudiées (Phu Tho, Mu Cang Chai, et Van Chan). Ces scénarios faisaient varier l'espèce cultivée (riz irrigué, riz aérobie, soja, maïs), sa date de semis (tous les 10 jours du 10 janvier au 1^{er} avril), l'altitude (tous les 200 m de 0 à 1 000 m) en tant que facteurs agissant sur la température par rapport à la température enregistrée à l'altitude de la station climatique de référence et, dans le cas du riz irrigué, le mode d'installation (repiquage ou semis au champ).

De manière à pouvoir prendre en compte le cas du régime pluvial, une deuxième version du modèle a ensuite été élaborée. Elle a été nommée WaTRYsim (Water, Temperature and Radiation determined Yield Simulator). Ce modèle fonctionne également au pas de temps journalier et est constitué des éléments suivants :

- un module simulant le bilan hydrique du sol et notamment le stock hydrique dans la zone colonisée par les racines ainsi que l'évaporation du sol, éventuellement recouvert par un mulch,

- un module simulant la transpiration des plantes,
- un module simulant la levée de la culture en fonction de la température de l'air (vue comme une approximation de celle du sol) et de l'état hydrique du sol en surface,
- un module simulant la descente en profondeur des racines dans le sol en fonction du stade de la culture, de l'état hydrique du sol, de la présence d'un éventuel obstacle à la croissance racinaire tel qu'un plancher imperméable de rizière,
- le modèle antérieur TRYsim modifié de manière à : (i) transmettre aux nouveaux modules les variables qui leur sont nécessaires (indice de surface foliaire LAI, stade de développement) ; (ii) recevoir certaines variables calculées par ces nouveaux modules (indicateur d'état hydrique de la zone colonisée par les racines, date de levée) ; et (iii) réduire la croissance du LAI, de la biomasse et du grain, par rapport aux valeurs calculées en absence de stress hydrique en fonction de l'indicateur d'état hydrique du sol.

WaTRYSim a ensuite été calé en utilisant les données observées au cours des expérimentations de terrain dans des conditions variées d'alimentation hydrique. Enfin, de même qu'avec le modèle précédent, WaTRYSim a été utilisé pour une expérimentation virtuelle. Les scénarios faisaient varier comme précédemment l'espèce cultivée (en se restreignant aux cultures pluviales cette fois ci, c'est-à-dire riz aérobie, soja, et maïs), sa date de semis (tous les 10 jours du 10 janvier au 1^{er} avril) et l'altitude (tous les 200 m de 0 à 1 000 m) en tant que facteurs agissant sur la température par rapport à la température enregistrée à l'altitude de la station climatique de référence. Un nouveau facteur est considéré et combiné avec les précédents, la présence ou l'absence d'un plancher imperméable de rizière, faisant obstacle à la croissance des racines en profondeur.

L'évaluation des scénarios simulés a été conduite dans les deux applications de la démarche en calculant pour chaque scénario les probabilités qu'une année donnée parmi les dix années de la série historique de données climatiques utilisée pour le scénario, la date de maturité se produise avant la date buttoir de repiquage du riz d'été, que la culture ne soit pas détruite par le froid, ou que le rendement atteigne ou dépasse un certain niveau.

Plus précisément, ont ainsi été calculées les probabilités suivantes (tableau 2) :

1) la probabilité que la date de maturité de la culture de printemps simulée soit antérieure au 5 juillet. Cette probabilité sera notée P1 pour l'expérimentation virtuelle en absence de stress hydrique, et Q1 pour l'expérimentation virtuelle en présence de stress hydrique. Q1 pourra différer de P1 dans la mesure où des retards de levée dus à l'état hydrique du sol et à la température peuvent retarder la date de maturité par rapport à la date calculée en considérant un semis à faible profondeur de graines pré-germées dans un sol maintenu humide ;

2) la probabilité que la culture ne soit pas compromise par le froid. Cette probabilité sera nommée P2 pour l'expérimentation virtuelle en absence de stress hydrique. Elle ne sera pas calculée pour l'expérimentation virtuelle en présence de stress hydrique ;

3) la probabilité que le rendement simulé atteigne au moins 0.7 fois la valeur maximale du rendement simulé, dans la série de données climatiques, pour le scénario considéré. Cette probabilité sera notée P3 pour l'expérimentation virtuelle en absence de stress hydrique et Q2 pour l'expérimentation virtuelle en présence de stress hydrique. Le seuil de 0.7 fois le rendement maximal du scénario a été retenu de manière à être sûr de ne pas tenir compte de différences de rendement qui seraient du même ordre de grandeur que les erreurs de simulation, un objectif de précision raisonnable pour le modèle étant de l'ordre de 20 % sur la variable rendement.

Tableau 2: Résumé des critères de probabilité pour la mise en place une culture de printemps dans les montagnes du Nord du Vietnam.

| Description | Légende | |
|--|-------------------------------|--------------------------------|
| | en absence de stress hydrique | en présence de stress hydrique |
| 1. Probabilité que la date de maturité de la culture de printemps simulée soit antérieure au 5 juillet | P1 | Q1 |
| 2. Probabilité que la culture ne soit pas compromise par le froid | P2 | - |
| 3. Probabilité que le rendement simulé atteigne au moins 0.7 fois la valeur maximale du rendement simulé | P3 | Q2 |

A partir de ces probabilités, pour chaque combinaison de culture, station climatique de référence, et altitude, une période favorable de semis a été définie par l'intervalle de dates de semis simulées pour lesquelles chacune des probabilités considérées dans l'expérimentation virtuelle est au moins égale à 0.8. Autrement dit, on assume ici comme acceptables des événements défavorables ne se produisant pas plus de 2 années sur dix. Ce niveau de risque, quelque peu arbitraire, est relativement commun dans les analyses fréquentielles des risques climatiques en agriculture lorsque les agriculteurs considérés ont, comme c'est le cas dans cette thèse, parmi leurs objectifs de production celui de satisfaire les besoins alimentaires de leur famille (Castella and Quang, 2002). Dans ce contexte, si l'on ne peut sans doute pas définir de stratégie permettant d'éviter tout risque, le niveau de risque acceptable sur les fluctuations des performances des cultures paraît logiquement plus faible que lorsque la production est complètement orientée vers le marché.

Chapitre 2. Contraintes de température et de rayonnement pour la culture de printemps

Ce chapitre est présenté sous la forme d'un article soumis en mai 2012 à la revue "Experimental Agriculture".

Sowing windows for a spring crop introduced in rice cultivation areas affected by low temperature and radiation

Short title: Modelling spring crops in highlands of SE Asia

Quyen Luu Ngoc ^{a,b1}, François Affholder^{b*}, Jennifer Montagne^b, Damien Jourdain^{c,d2}, Aude Ripoche^e, Alain Capillon^f

Addresses:

- a. VAAS, NOMAFSI, Food Crop Department, Phu Ho Commune, Phu Tho Town of Phu Tho Province, Viet Nam
- b. CIRAD, UMR System, IRRI, Bat. 27, Supagro, 2 places Viala, F-34060 Montpellier, France
- c. UMR G-Eau, IRRI, 361 rue J.F. Breton, BP 5095, F-34196 Montpellier Cedex 5, France
- d. Int Rice Res Inst, Manila, Philippines
- e. CIRAD, UPR SCA, F- 34398 Montpellier, France
- f. Supagro, UMR System, F-34060 Montpellier, France

Corresponding author: guyengret@yahoo.com

¹ CIRAD, UPR SCA, F-34398 Montpellier, France

² CIRAD, UMR G-EAU, AIT, School of environment Resources and Development, 12120 Bangkok, Thaïlande / UMR G-Eau, F-34398 Montpellier, France

ABSTRACT

In mountainous areas of Continental South East Asia, double cropping in the irrigable valleys and terraces is often promoted as a way to increase farmers' income while alleviating the pressure of agriculture on fragile slopes. However, cold temperature and low global radiation may constrain this strategy. Lethally cold events may occur, and increases in crop cycle length may jeopardize the correct timing of the main rice crop, taking place in summer. The model TRYsim (Temperature- and Radiation-limited Yield Simulator) was built to simulate the impact of temperature and radiation on the development and yield of the three crops that are most often considered as spring crops in the irrigable land of the northern mountains of Vietnam: rice, soybean and maize. TRYsim was successfully calibrated using experimental data. Then a virtual experiment was designed in order to simulate various scenarios combining spring crop species and sowing date with climatic data accounting for variability of climate across years, location and elevation. It allowed to define favourable 'sowing windows' for non water limited environments, based on the three following criteria: high average yield, low incidence over years of lethally cold events and low incidence over years of delays in the maturity of the spring crop. The length of this sowing window varied greatly across the scenarios tested. The widest was obtained for the case of Soybean whatever the location and elevation, which makes it the less risky of the tested options. The approach followed proved effective to identify favourable and unfavourable environments for introducing a spring cycle in the mountains of Vietnam, in order to help better targeting the policy in support to the introduction of a spring crop.

KEYWORDS: irrigated rice, crop cycle, phenology, cold temperature, crop management sequence, model.

Abbreviations:

CIRAD: French Agricultural Research Centre for International Development (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement)

LAI: Leaf Area Index.

NOMAFSI: Northern Mountainous Agriculture and Forestry Science Institute.

1. INTRODUCTION

In order to preserve sensitive natural areas on the mountain slopes of Continental Southeast Asia, one of the strategies adopted by governments is to intensify agriculture in irrigable valleys bottoms and terraced hillsides to guarantee an income or a sufficient subsistence base for farmers, enabling them to alleviate the pressure exerted on other landscape compartments (Linguist et al., 2007). The introduction of a second crop cycle - 'spring crop' – in irrigable fields before the main summer rice crop each year takes part of this strategy. Whereas rice–rice double cropping is a common practice in regions of low altitude of Asia, its expansion to higher altitudes is hampered by climatic constraints (Feng and Fu, 1989; Dat Van, 1997). The mountainous area of continental Asia lies at latitudes greater than 20°N were, during winter and spring, temperatures and incident solar radiation are substantially lower and more variable between years and sites than they are during the summer. On one hand, at the beginning of the spring season, temperature occasionally reaches particularly low values that may be lethal for a crop. In addition daily solar radiation is particularly low at this period (e.g in Vietnam, Figure 1). As a consequence, the radiation potentially used by a crop, as well as the likeliness that the crop escapes from lethal temperature both increase if the crop is sown later in the season. On the other hand, harvest must occur early enough to allow a proper timing of the main rice cycle that takes place during the summer, wet and warm season. Thus, the opportunity to grow an irrigated spring crop in the highlands of continental Asia depends on risks of crop failure due to cold temperatures, reduced yields under low global radiation, and risks that the date of crop maturity delays the installation of the summer crop. Conventional experiments aiming at assessing these risks would have to be repeated in many locations and years since they are all highly dependent on temperature and global radiations conditions that are expected to vary strongly with locations and years in mountainous areas. An alternative is the use of virtual experiments performed with adequate simulation models.

The objective of this study is to propose such simulation tool, TRYSim (Temperature- and Radiation-limited Yield Simulator), aiming at better identifying, across locations and accounting for inter-annual climate variability, the extent to which radiation and temperature constrain the feasibility of a spring crop through yield reduction, crop mortality, or excessive increase in crop duration in mountainous areas of continental Asia. The model was calibrated and applied to the study case of introducing a spring crop before rice in the northern mountainous area of Vietnam.

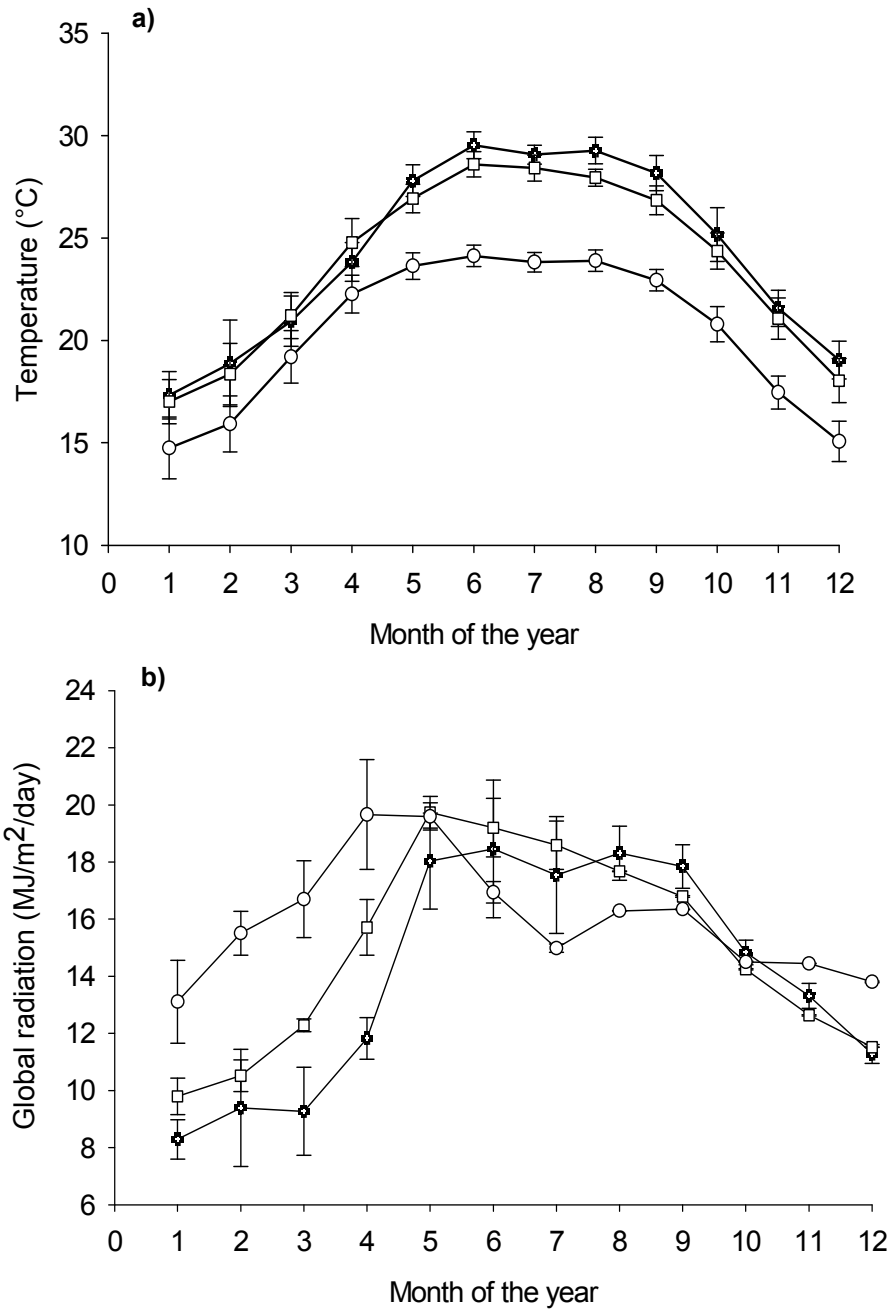


Figure 1: Monthly variation of (a) temperature and b) global radiation during spring season in 3 locations Phu Ho (—●—), Van Chan (—□—), and Mu Cang Chai (—○—). Mean over 10 years \pm standard deviation.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Study region and general methodology

The mountainous area of Vietnam is a typical case where the government encourages the development of spring crops. Rice, aerobic rice (i.e. able to withstand periods when the rice field is not flooded, (Bouman et al., 2005), soybean and maize are the main options promoted by agricultural extension services who provide, additionally to

technical training, seeds and fertilizers at attractive prices. Yet so far, in several municipalities of this area, double cropping became the most common practice among farmers. However, it failed to develop in many other locations, climatic constraints and the lack of adapted cultivars being possible causes. The summer season begins at the end of June with direct sowing or establishment of nurseries, transplanting taking place around 10-15 July at the latest. Between the spring and summer crops, farmers need around 10 to 15 days for harvesting, threshing and transport, and for soil preparation. So, in order to introduce a spring crop without hampering the summer rice, cultivars and sowing dates have to allow harvesting the spring crop by July, 5 at the latest.

Irrigated rice fields in the northern highlands of Vietnam are found not only along valley floors, with elevation ranging from 15m to 500m (e.g. in Pho Yen, Thai Nguyen and Muong Thanh, Dien Bien Phu, respectively), but also on terraces carved along slopes, at elevation over 1400 m (e.g., Sa Pa, Lao Cai). Apart from the effects of elevation and slope, the climate of the region is known to vary greatly across space. Latitude and the position relatively to the main axis of the relief are key factors of this variation. The cultivars currently available in spring season in Vietnam for the previously mentioned crops (rice, aerobic rice, soybean, and maize) are insensitive to photoperiod, so that their cycle duration is mainly determined by temperature, the time interval between sowing and maturity increasing when temperature decreases (Rezaul, 1997). As a consequence, at a given location and for a given cultivar insensitive to photoperiod, the likeliness of completing the spring cycle before the 5th of July is expected to increase with the earliness of the sowing date.

The methodology adopted to meet the objectives of this study consists in two main stages. The first stage was devoted to calibrating the TRYSim model which simulates phenological development and crop growth for rice (irrigated and in 'aerobic' condition), maize and soybean without growth limitations from water, nutrients, pests or diseases. The purpose was therefore to estimate potential yield as defined by Lobell et al. (2009) for irrigated systems. TRYSim was built following the guidelines proposed by Sinclair and Seligman (1996) for *ad hoc* modelling. The model was specifically constructed for the study, using as much as possible simple relationships and model components that have proven to be robust after numerous tests in various environments including environments and crops similar to those of this study. In the second stage, the model was used for virtual experiments in which cropping systems were simulated using long term series of temperature and radiation data for a set of locations of contrasted climates, under scenarios combining varied elevations and sowing dates.

2.2. Model description

TRYSim was written in VBasic under Microsoft Access, so as to facilitate virtual experiments based on principles of interfacing between models and databases described by

Affholder et al (2012). It uses a daily time step and simulates the duration of a crop cycle depending on thermal time, leaf area index (LAI) dynamics during the cycle, total aboveground biomass production resulting from the interception of incident solar radiation by the LAI, its conversion into biomass depending on the temperature, and yield through the allocation of a share of that biomass to the grain during a grain filling development phase, also determined by thermal time. The model also simulates the mortality of crops exposed to excessively cold temperatures. It accounts for transplanting and its impact on crop development and growth. The crop is assumed to be sown at a “standard” stand density corresponding to the recommendation made by the farmer support service in the region (see section 2.3).

2.2.1. Phenological development model

Crop development is simulated using the thermal time approach (Gao et al., 1992). A given stage of development i that started on day k is completed on day n if:

$$TC(i) = \sum_{k+1}^n f(T) \quad (1)$$

Where $f(T) = 0$ if $T < T_{dmin}$; $f(T) = T - T_{dmin}$ if $T_{dmin} < T < T_{dmax}$; $f(T) = T_{dmax} - T$ if $T > T_{dmax}$; T is the daily average air temperature ($^{\circ}C$) and TC the thermal time constant of the cultivar at stage i ($^{\circ}C.d^{-1}$); T_{dmin} and T_{dmax} are minimal and maximal thresholds for development of the cultivar. The (i) stages considered were: (1) emergence, (2) end of the juvenile phase corresponding to slow LAI growth, (3) end of rapid LAI growth, (4) start of grain filling (end of flowering), (5) start of senescence and (6) maturity.

The effect of transplantation on development was adapted from the Oryza 2000 model by Bouman et al. (2001): development is stopped after transplantation for a duration StressShock expressed in thermal time.

From crop emergence to stage 2, the model simulates crop death in the event of exposure to an average daily temperature below a “critical cold” temperature (T_{cold}) for a number N_{cold} of consecutive days, also as in the Oryza 2000 model.

2.2.2. LAI dynamics over the crop cycle

From stages 1 to 3, the LAI is simulated using a logistic function of thermal time borrowed from the model STICS by Brisson et al. (2002):

$$dLAI = dLAI_{max} / (1 + \exp(5.5 * (1.5 - ULAI))) * (T - T_{dmin}) \quad (2)$$

Where $dLAI$ is the daily increase in LAI; $dLAI_{max}$ is the maximum LAI value; $ULAI$ is the leaf development unit, ranging from 1 to 1.5 between stage 1 and stage 2, and from 1.5 to 3 between stage 2 and stage 3. Between the stages, $ULAI$ is linearly interpolated between these values, proportionally to thermal time. From stage 3 to stage 5 LAI is constant. It then decreases linearly with thermal time, down to the LAI_{mat} value reached at maturity (stage 6).

2.2.3. Simulation of above ground biomass and grain yield

The simulation of light interception by leaves, its conversion into biomass and distribution between grain and the rest of the above ground biomass were all borrowed from STICS. Solar radiation intercepted by the leaves R_{int} is calculated for a day d according to Beer-Lambert's law depending on LAI:

$$R_{int}(d) = 0.48 \cdot GR(d) \cdot (1 - \exp(-K_{ext} \cdot LAI(d))) \quad (3)$$

Where GR is the global daily radiation and K_{ext} is the coefficient of radiation extinction for the crop in question.

Then, the daily accumulation of biomass, $dBiom$, is calculated by the equation:

$$dBiom(d) = (E_{bmax} \cdot R_{int}(d) - 0.0815 \cdot R_{int}(d)^2) \cdot F_{temp}(d) \quad (4)$$

Where E_{bmax} is the maximum efficiency of radiation conversion into biomass, and F_{temp} is a function accounting from non-optimum temperatures as follows:

$F_{temp}(d) = 0$ if $T(d) < T_{cmin}$ or $T > T_{cmax}$;

$F_{temp}(d) = 1$ if $T(d) = T_{copt}$;

$F_{temp}(d) = 1 - (T(d) - T_{copt}) / (T_{cmin} - T_{copt})$ if $T_{cmin} < T(d) < T_{copt}$;

$F_{temp}(d) = 1 - (T(d) - T_{copt}) / (T_{cmax} - T_{copt})$ if $T_{copt} < T(d) < T_{cmax}$,

Where T_{cmin} , T_{copt} , T_{cmax} are the crop specific parameters.

In this model, the grain yield, $Grain(d)$, on day d between stage 4 and stage 6 (maturity) is a function of harvest index $HI(d)$ which increases linearly from 0 as a function of thermal time with a crop specific rate called $Vitircarb$ and without exceeding a maximum value (HI_{max}). Grain yield is also limited by the number of grains formed per unit area, N_{grains} , and the maximum weight of a grain, $P1_{grainMax}$, as follows:

$$Grain(d) = \min(Biom(d) \cdot \min(HI(d), HI_{max}), P1_{grainMax} \cdot N_{grains}) \quad (5)$$

Where N_{grains} is a linear function of average biomass growth VT_{mean} over a duration N_{grains} preceding stage 4:

$$N_{grains} = \min(N_{grmax}, C_{grain} \cdot VT_{mean} + C_{grainV0}) \quad (6)$$

Where N_{grmax} is the cultivar specific maximum number of grains per unit area at the standard stand density used, and C_{grains} and $C_{grainV0}$ are crop specific calibration parameters.

Some of the parameters of this model were known for the species considered in our study and were based on the values provided in the literature (Table 1). A certain number of other parameters were calibrated using a specific experimental design.

Table 1: Values of the parameters used in the TRYsim model.

| Parameter name | Parameter description | Determination | Values of the cultivar | | | |
|------------------------|---|---------------|------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| | | | Irrigated rice | Aerobic rice | Soybean | Maize |
| Tdmin | Minimum development temperature (°C) | L | 8 ^(1,2,3) | 9 ^(1,2,3) | 8 ^(4, 5) | 11 ⁽⁶⁾ |
| Tdmax | Maximum development temperature (°C) | L | 40 ⁽⁷⁾ | 40 ⁽⁷⁾ | 40 ^(8, 5) | 40 ⁽⁶⁾ |
| Tcmin | Minimum temperature for light conversion into biomass (°C) | L | 10 ⁽⁹⁾ | 10 ⁽⁹⁾ | 6 ^(4, 5) | 8 ^(10,6) |
| tcmax | Maximum temperature for light conversion into biomass (°C) | L | 42 ^(1,3,9) | 42 ^(1,2,3) | 45 ^(4, 5) | 42 ⁽¹⁰⁾ |
| tcopt | Optimum temperature for light conversion into biomass (°C) | L | 28 ⁽⁹⁾ | 29 ⁽²⁾ | 30 ^(4, 5) | 28 ⁽⁶⁾ |
| Tcold | Cold sensitivity threshold temperature (°C) | L | 9 ⁽¹¹⁾ | 9 ⁽¹¹⁾ | 8 ^(12,13) | 8 ⁽¹⁴⁾ |
| NDieCold | Maximum number of days below Tcold withstood by the crop without death | L | 5 ⁽¹¹⁾ | 5 ⁽¹¹⁾ | 4 ⁽¹³⁾ | 5 ⁽¹⁴⁾ |
| Kext | Radiation extinction | L | 0.6 ⁽⁹⁾ | 0.5 ⁽⁹⁾ | 0.5 ⁽⁴⁾ | 0.7 ⁽¹⁰⁾ |
| dLAI _{max} | Maximum LAI growth rate of a plant per degree (m ² .°C ⁻¹) | C | 1.2*10 ⁻⁴ | 2.4*10 ⁻⁴ | 5.8*10 ⁻⁴ | 1.45*10 ⁻³ |
| LAI _{mat} | Residual LAI at maturity | C | 0 | 0 | 2 | 0 |
| Eb _{max} | Maximum coefficient of radiation conversion | C | 3.3 | 2.6 | 1.8 | 3.8 |
| HI _{max} | Maximum harvest index | C | 0.52 | 0.42 | 0.58 | 0.48 |
| P1 _{grainMax} | Maximum weight of 1 grain (g) | C | 0.03 | 0.025 | 0.205 | 0.299 |
| Ngr _{max} | Maximum number of grains per plant | C | 1500 | 1000 | 200 | 800 |
| Vitircarb | Daily increase in harvest index (gDM.d ⁻¹) | C | 0.018 | 0.017 | 0.015 | 0.009 |

C: parameter calibrated using data from the experiment; L: value from the literature

1: Bouman et al. (2001); 2: Fukai (1999); 3: Alocilja (1991); 4: SOYGRO model, Brisson et al. (1989); 5: SOYDEV model, Setiyono et al. (2007); 6: CERES-Maize model, Birch et al (1998); 7: Dingkuhn (1995); 8: Hungria et al (2001); 9: Confalonieri et al. (2009); 10: STICS model, Brisson et al. (1998); 11: Andaya and Mackill (2003); 12: Wang et al. (1997); 13: Schleppi et al. (1990); 14: Janowiak (2003).

2.3. Experiments for model calibration

The purpose of the experiments was to calibrate the TRYSim model for the 4 crops involved in this study: irrigated rice, aerobic rice, soybean, and maize. The crop cultivars considered were the ones currently best adapted to the spring season according to the local research and extension institutions, NOMAFSI (Le Quoc Doanh and Luu Ngoc Quyen, 2007). This cultivar was for irrigated rice, Nui uu 838 (F1 hybrid, indica type), IR74371 (indica type) for aerobic rice cultivar, cultivar DT84 for soybean, and cultivar LVN99 (F1 hybrid) for maize. All the experiments were sown at standard stand density as recommended by NOMAFSI, i.e. transplanted irrigated rice at 40 plants/m², and direct seeded rice at 90 plants/m²; aerobic rice at 22 plants/m², soybean at 30 plants/m², and maize at 6.2 plants/m².

The experiments consisted in establishing growing situations that were as close as possible to potential growth conditions, i.e. without any biotic or abiotic stress, on soils that were as suitable as possible. These situations were created with N-P-K fertilization equal to 100-100-80, plus 10 tonnes of manure/ha for rice and aerobic rice; 30-60-60, plus 8 tonnes of manure/ha for soybean; 160-90-90 plus 10 tonnes of manure/ha for maize. The plots were irrigated to avoid any water stress and were meticulously and repeatedly weeded, with regular phytosanitary monitoring and appropriate phytosanitary treatments if needed. By varying the locality, elevation, year and sowing date within the year, we sought to establish contrasting temperature and radiation conditions representative of the end of the winter and the spring in the northern highlands of Vietnam. The plots were monitored at two sites during 2010 and 2011:

- Phu Ho – Phu Tho (N 21°27'; E 105°14'): the elevation varied from 30 to 50 m and only imperfectly represented mountain climatic conditions. The advantage of this site was its immediate proximity to the NOMAFSI centre, so more intensive measuring was possible. Each year, for each crop (and planting method in the case of irrigated rice) three sowing dates were tested at this site: early sowing from 28 to 30 January, intermediate sowing from 8 to 10 February and late sowing from 19 to 22 February.

- Suoi Giang - Van Chan (N 21°57'; E 104°57'): this site was more representative of mountain climates, with the elevation varying from 200 to 1100 m over a few kilometres, and experimental plots located at three different elevations were available: 300, 600 and 800 m. The downside of this site was the distance from the NOMAFSI research infrastructures. This site was used for a simplified experimental design with a single sowing date tested each year.

Each growing situation considered in this study was thus defined by the species cultivated (with the chosen cultivar of that species), the year, the sowing date in the year, the location, the elevation of the location in the case of the Suoi Giang site, and the planting method in the case of irrigated rice. Each of these growing situations was replicated three

times in unit plots of 15 to 30 m². At the Phu Ho site, the layout of the sampling plots formed a randomized block design each year for each crop, with three replicates for the “sowing date in the year” factor. There was an automatic weather station (CIMEL) at each site providing daily minimum, maximum, mean air temperatures and daily cumulative global radiation. In addition, recording thermometers were positioned in sheltered ventilated places in the immediate vicinity of each of the experimental plots in the design.

In all the unit plots, emergence, tillering (rice), flowering, and maturity were monitored along the crop cycle. Above ground biomass and LAI (using a LICOR LI-2000) were also monitored (one measurement at flowering in 2010, 4 measurements in 2011 for above-ground biomass; every 10-12 days at Phu Ho and 15-20 days at Suoi Giang for LAI). Yield components were measured at harvest using samples taken on 1 m² for irrigated and aerobic rice, and on 3 m² for soybean and maize.

2.4. Model calibration

For parameters specific to the cultivars used, or more generally for all parameters for which there were no valid estimations in the literature for the conditions of our study, we sought the best fit, for each parameter taken one by one, between the simulated variables depending on that parameter and the corresponding observed variables, in order to minimize RMSE (Root Mean Squared Error) and the bias (average deviation between observed and simulated values), for all the experimental growing situations for each crop in our design. Thermal constants were first calibrated for the emergence to flowering and the flowering to maturity period. Next, the parameters of LAI dynamics, i.e. dLAI_{max}, LAI_{mat}, and those of the thermal constants not determined at the previous step were estimated by fitting simulated LAI curves to observed LAI data. Eb_{max} was estimated by fitting simulated biomass to above ground biomass measurements at flowering and maturity. C_{grain} and C_{grainV0} were obtained plotting observed values of N_{grain} against simulated values of V_{itmean} averaged over the flowering stage. P1_{GrainMax} was taken at the highest value observed in our experiment. Finally, H_{lmax} and V_{itcarb} were calibrated fitting simulated to observed grain yields.

2.5. Virtual experiment

The virtual experiment consisted in simulation scenarios including all the possible combinations for the following 5 factors: (1) climatic year (10 years tested), (2) elevation (6 in all, every 200 m from 0 to 1000 m); (3) crop (irrigated rice, aerobic rice, soybean, maize); (4) sowing date (every 10 days, from the 10th to the 90th day of the year), and (5) location (3 locations). Three locations were considered, chosen for representing contrasted climates in terms of temperature and radiation during spring (Figure 1), and for the availability of daily data of solar radiation and minimum and maximum temperature for the period 1989-2002, as follows: Phu Tho, in the northwestern hill region with low solar radiation and relatively high

temperature in spring; Mu Cang Chai in the northwestern mountain region with high radiation and relatively low temperature in spring, and Van Chan in an intermediary position geographically and in terms of solar radiation in spring, temperature being close to that of Mu Cang Chai. In all these locations, a significant share of agricultural land is irrigated, in valley floors as well as on terraces of diverse elevation. In the case of irrigated rice, the planting technique (direct sowing and transplanting) was tested as an additional factor. The elevation factor was accounted for solely through its impact on air temperature as calculated using the equation from Baker (1944):

$$T_z = T_0 - 0.6 (z - z_0) / 100 \quad (7)$$

Where T_z is the temperature in °C of a given height z (m) above sea level and T_0 is the temperature in °C at a given location characterized by an elevation z_0 .

The simulations provided grain yield (being zero in the event of lethally low temperatures and total crop cycle duration for each combination of factors. The results were analyzed per location and crop in two main steps. First were assessed separately the criteria of yield reduction due to low solar radiation and temperature, crop mortality due to excessively low temperature, and increase in crop duration due to low temperature and incompatible with latest date for summer crop installation. This was done by calculating, per sowing date, crop and elevation, the probability that a given year (within the set of years in the weather station data set for the location):

- simulated crop maturity is reached before 5 July (P1),
- simulated crop is not destroyed by excessive cold (P2),
- simulated yield exceeds 0.7 Y_{max} , where Y_{max} is the highest simulated yield of the crop at the location an elevation considered, over years and sowing dates (P3).

Second, was calculated for each crop, location, and elevation a single indicator of temperature and radiation constraining spring crop. This indicator was the length in days of a favourable window for sowing a spring crop (FWS), defined as the simulated sowing period for which P1, P2, and P3 were all over 0.8.

3. RESULTS

3.1. Growth conditions established in the experiment

In some of the experimental plots, events such as water shortage in the irrigation system, shortage of fertilizers or labour force for weeding at the experimental site occurred. These circumstances prevented to maintain the plot free of any nutrient, water or biotic stress. The final set of valid growing situations, i.e. those where we could assume that crop growth was not limited by water, nutrients or pests or disease throughout the cycle consisted of 8 situations for rice; 4 for aerobic rice; 3 for maize, and 3 for soybean.

The experimental design set up effectively provided growing conditions exposed to varied radiation and temperature conditions representative of the springtime climate conditions in the northern highlands of Vietnam. Across the valid growing situations established in the two year experiment, the temperature averaged over the duration of crop cycle varied similarly to the 10-years inter-annual distribution of temperature averaged over the spring season (Figure 2a). More specifically, the temperature averaged over the crop cycle was in our experiment between 18.6°C and 25.5°C, while 75% of spring-averaged temperature ranged between 23.7 and 24.9°C at Phu Ho, 23.7 and 24.4°C at Van Chan 300m, 20.7 and 21.4°C at Van Chan - Suoi Giang 800m, and 20.8-21.5°C at Mu Cang Chai during the 1989-2002 period.

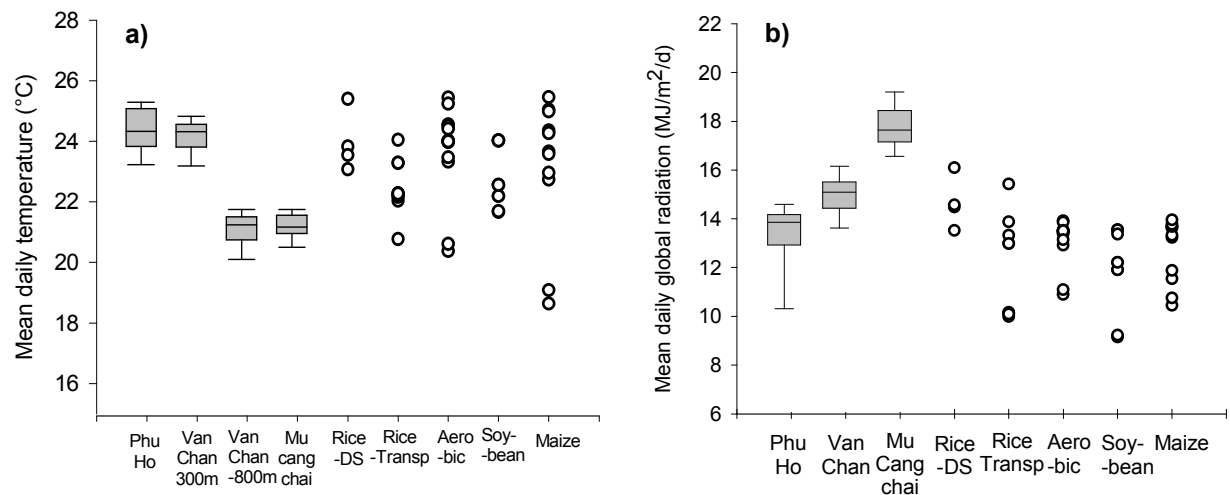


Figure 2: Mean daily temperature (a) and global radiation (b) during spring season observed for the 4 crops studied in the experiment (dots) as compared to the climate of the Northern Mountains of Vietnam (whisker boxes).

Whisker boxes: inter-annual distribution of temperature averaged over 14 and 12 years at Phu Ho and Mu Cang Chai, and Van Chan, respectively (from 1st of february to the 30, June). **Dots:** temperature averaged over the period from sowing to maturity for each growing condition established in the 2-years experiment.

The values of daily solar radiation averaged over the cycle in our experiment ranged over an interval (9.1 to 16.1 MJ.m⁻².day⁻¹) comparable to the variation interval over years of spring averaged radiation in the region (10.3 to 19.2 MJ.m⁻².day⁻¹). However, most of the growing situation established in our experiment, were below 14.7 MJ.m⁻².day⁻¹, and thus reflect radiation conditions that are among the lower half of those observed in the mountainous region of Vietnam (Figure 2b).

3.2. Model calibration

The calibrated thermal constants (TC) of all the crops studied are given in table 2 for the main phenological stages considered in the model. Using these calibrated values of TC, TRYSim correctly simulated the spring crop cycle length, the time from emergence to flowering, and the time from flowering to maturity (Table 2, Figure 3). The relative RMSE (RMSE divided by mean of observed values) associated with the cycle length simulation were satisfactorily low, from 2% (irrigated rice) to 5% (aerobic rice). The bias were also quite low, despite a slight tendency towards underestimation of total cycle duration, the bias remaining mostly below 1.5 days whatever the crop. Thus calibrated, the model proved suitable for an accurate estimation of crop cycle duration during spring in the Northern Mountains of Vietnam for the studied cultivars of maize, rice and soybean.

Table 2: Calibrated Thermal Constants (TC, in degree days) at the main stages of the 4 crops studied.

Stage 1: emergence, stage 3: end of rapid LAI growth, stage 4: start of grain filling, stage 6: maturity. RMSE = root mean squared error, RRMSE = relative root mean squared error.

| Cultivar name | Stage name | TC of stage | Number of situations | Average duration observed (days) | RMSE (days) | RRMSE | Bias |
|-------------------------------|--------------------------|-------------|----------------------|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Irrigated rice (NU838) | stage 1 – stage 3 | 1431 | 14 | 110.5 | 3.8 | 0.03 | 1.3 |
| | stage 4 – stage 6 | 651 | 14 | 28.9 | 3.1 | 0.11 | -1.2 |
| | stage 1 – stage 6 | 2082 | 14 | 139.4 | 3.1 | 0.02 | -1.2 |
| Aerobic rice (IR74371) | stage 1 – stage 3 | 1297 | 13 | 92.6 | 7.2 | 0.08 | 1.3 |
| | stage 4 – stage 6 | 575 | 13 | 31.2 | 6.0 | 0.19 | -0.7 |
| | stage 1 – stage 6 | 1872 | 13 | 123.7 | 6.0 | 0.05 | -0.7 |
| Soybean (DT84) | stage 1 – stage 3 | 622 | 9 | 42.6 | 6.4 | 0.15 | -5.2 |
| | stage 4 – stage 6 | 708 | 9 | 44.3 | 2.2 | 0.05 | -0.3 |
| | stage 1 – stage 6 | 1330 | 9 | 86.9 | 2.2 | 0.03 | -0.3 |
| Maize (VN99) | stage 1 – stage 3 | 753 | 11 | 73.0 | 3.3 | 0.05 | -1.8 |
| | stage 4 – stage 6 | 680 | 11 | 41.2 | 4.8 | 0.12 | -1.3 |
| | stage 1 – stage 6 | 1433 | 11 | 114.3 | 4.8 | 0.04 | -1.3 |

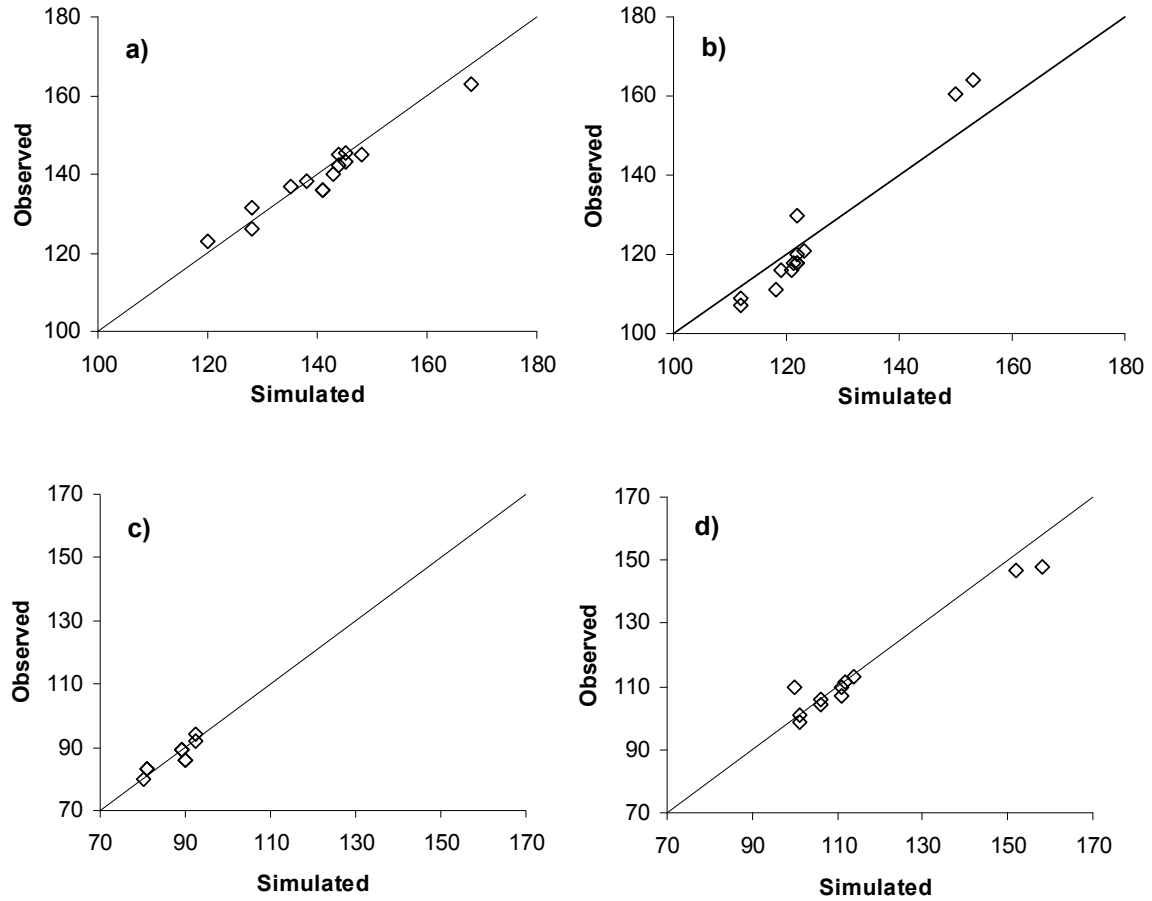


Figure 3: Observed and simulated cycle length (in days) for a) rice at Phu Ho and Van Chan, b) aerobic rice, c) soybean and d) maize at Phu Ho. Solid lines are the 1:1 lines.

The calibration of the other parameters of the TRYSim model (Table 1) led to satisfactory simulation of LAI and biomass dynamics in the growing situations maintained free from any water, nutrient or biotic stress (see examples in figure 4). Table 3 presents the calibration results obtained for the different spring crops studied and the following variables: LAI at flowering, above ground biomass and grain yield at harvest. The calibrated model was found particularly accurate for estimating rice (RRMSE= 3%). The highest value of RRMSE for yield was the one obtained for maize, 14%, which remains acceptable. Yield of soybean yield and aerobic rice were estimated with a RRMSE of 6% and 8% respectively. The model was therefore found suitable for estimating potential yield of the studied cultivars of maize, soybean, and irrigated and aerobic rice under temperature and radiation regimes of the mountainous area of Vietnam.

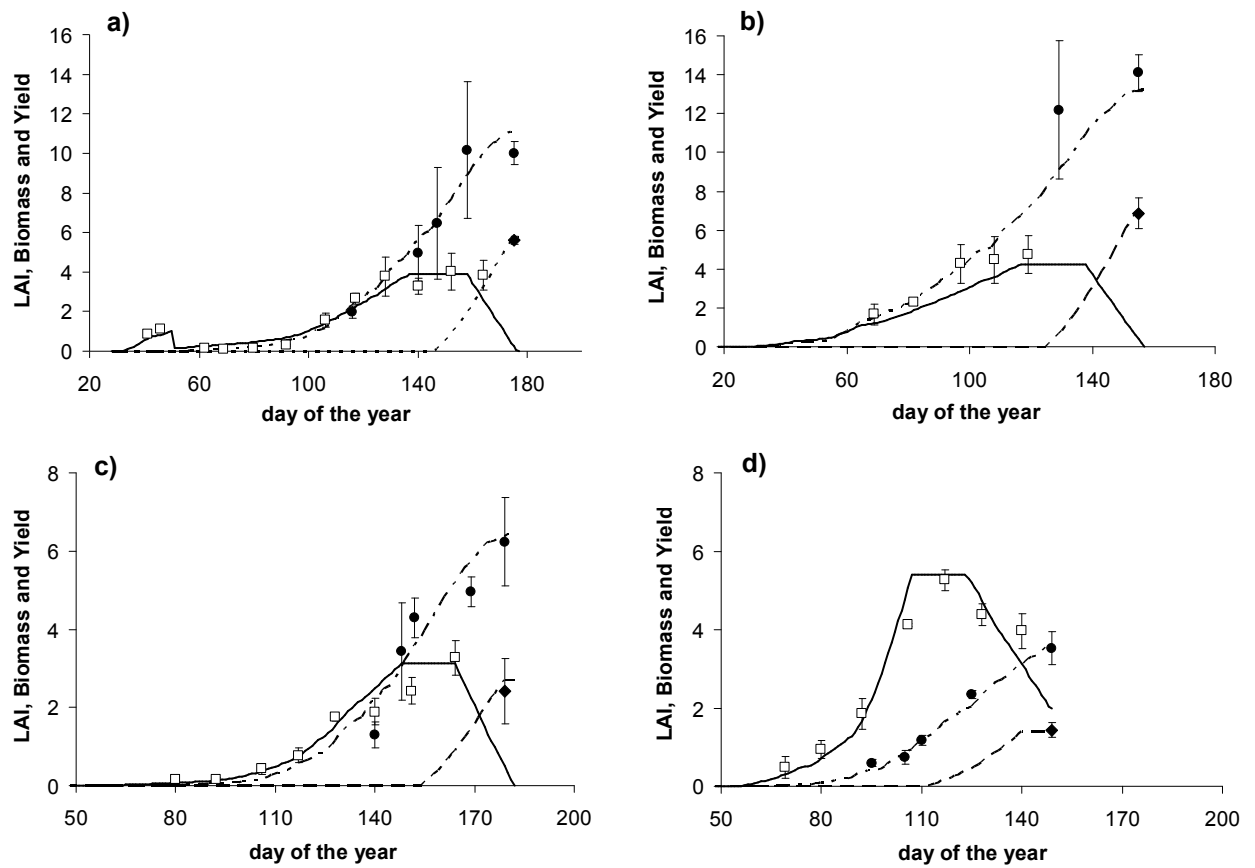


Figure 4: Observed (\square) and simulated LAI (—); observed (\bullet) and simulated biomass (---); observed (\blacklozenge) and simulated grain yield (----) of crops situations at Phu Ho for a) transplanted rice in 2011; b) directly sown irrigated rice in 2010; c) late sowing from 19-22 February 2011 for aerobic rice; d) late sowing from 19-22 February 2011 for soybean.

Mean \pm standard error.

Table 3: Maximum LAI, average biomass at harvest and average grain yield simulated by the model at Phu Ho for aerobic rice, soybean and maize and at two locations (Phu Ho and Van Chan) in irrigated rice growing situations.

RMSE = root mean squared error, RRMSE = relative root mean squared error.

| Crop | Variables | Number of growing situations | Average observed value | RMSE | RRMSE |
|-----------------------|---|------------------------------|------------------------|------|-------|
| Irrigated rice | LAI _{max} (m ² .m ⁻²) | 8 | 4.29 | 0.27 | 0.06 |
| | Biomass at harvest (T/ha) | 8 | 11.83 | 0.71 | 0.06 |
| | Grain yield (T/ha) | 8 | 6.08 | 0.20 | 0.03 |
| Aerobic rice | LAI _{max} (m ² .m ⁻²) | 4 | 4.0 | 0.37 | 0.11 |
| | Biomass at harvest (T/ha) | 4 | 6.77 | 0.64 | 0.10 |
| | Grain yield (T/ha) | 4 | 3.0 | 0.25 | 0.08 |
| Soybean | LAI _{max} (m ² .m ⁻²) | 3 | 4.7 | 0.4 | 0.09 |
| | Biomass at harvest (T/ha) | 3 | 3.57 | 0.46 | 0.14 |
| | Grain yield (T/ha) | 3 | 1.42 | 0.07 | 0.06 |
| Maize | LAI _{max} (m ² .m ⁻²) | 4 | 3.0 | 0.25 | 0.08 |
| | Biomass at harvest (T/ha) | 3 | 11.91 | 1.0 | 0.08 |
| | Grain yield (T/ha) | 3 | 4.66 | 0.67 | 0.14 |

3.3. Virtual experiment

3.3.1. Risk of excessive cycle duration

Figure 5a illustrates the influence of sowing date and elevation on P1, i.e. the simulated probability that crop maturity occurs after 5th of July for the case of Maize at Phu Ho. In that particular case, at the tested elevations greater than 600m, even with the earliest considered sowing date, there was a significant risk (passing two years over 10, or P1<0.8) that simulated maturity occurs later than 5th of July, hampering the setting of the main crop, summer rice. The elevation threshold above which P1 < 0.8 for the earliest sowing date varied with location and crop. It was between 600 and 800m for direct seeded rice at Van Chan and Maize at Phu Ho, and exceeded 1000m for Soybean at Mu Cang Chai (data not shown). Above such elevation threshold, FWS (the length of the favourable window for

sowing a spring crop) was zero due to excessive crop duration. Below this elevation threshold, there was an interval of sowing dates for which $P1 > 0.8$. The size of this interval increased as elevation decreased.

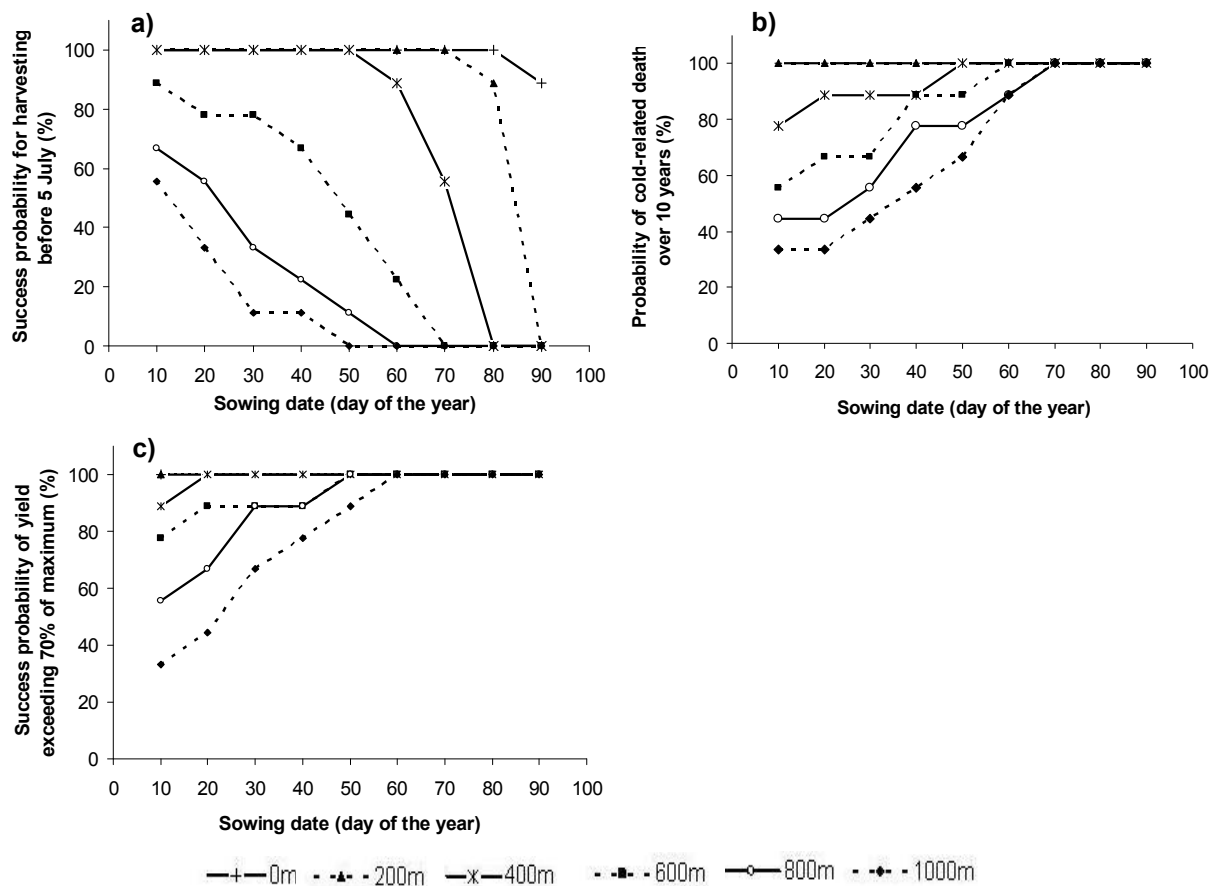


Figure 5: Effect of sowing date and elevation at Phu Ho on a) the probability $P1$ of reaching maturity before 5 July for maize, b) the probability $P2$ of avoiding lethally cold events for transplanted rice, and c) the probability $P3$ of achieving yield over 70% of maximum yield in growing situations for maize.

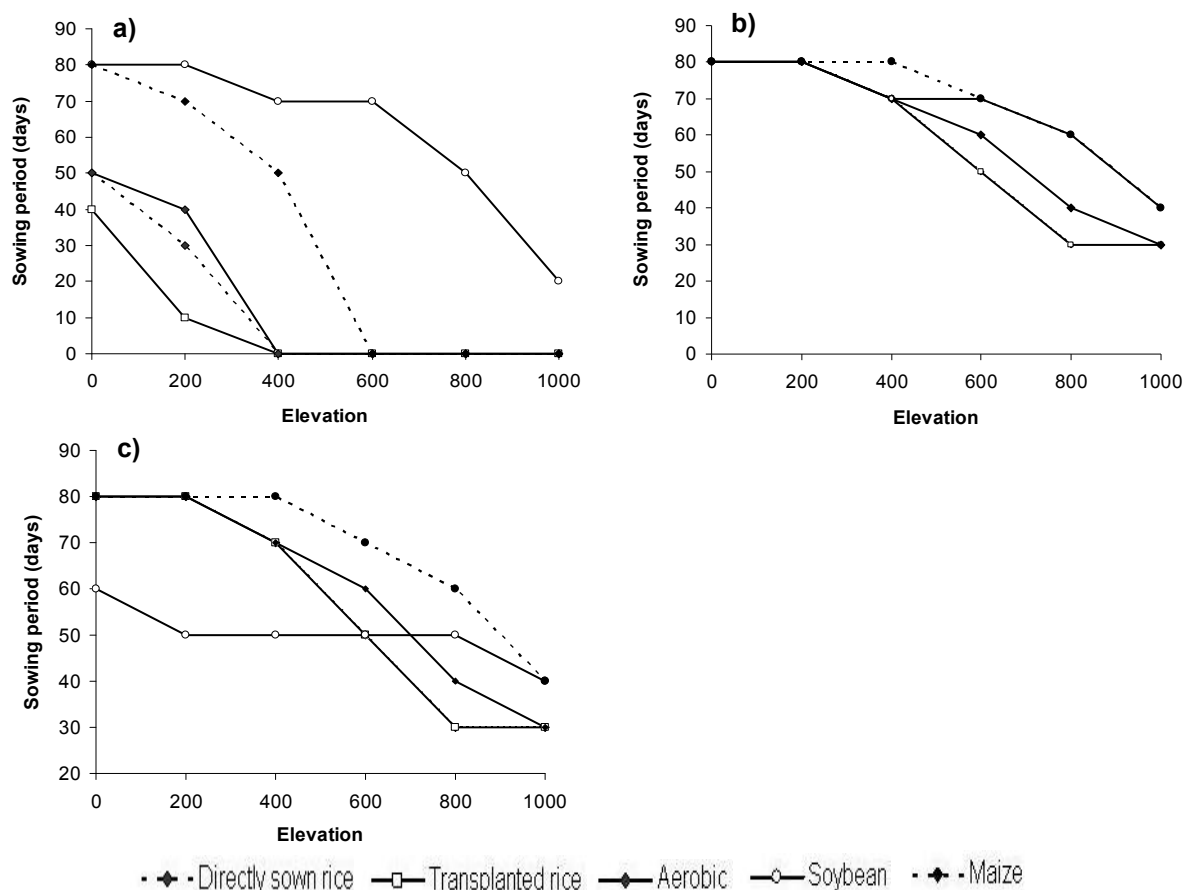


Figure 6: Length of the sowing period related to elevation for the 4 crops studied at Phu Ho when a) the probability P_1 for spring crop to reach maturity before 5 July > 80%, b) the probability P_2 > 80%, and c) the probability P_3 of achieving yield over 70% of maximum yield in the growing situations > 80%.

Figure 6a presents the size of this interval of sowing date favourable to spring crop on the criteria of its compatibility with the setting of summer rice, as depending on crop and elevation at Phu Ho, the coldest location among those studied when temperatures are corrected to sea level. The crops could be classified in decreasing order of risk that spring cycle conflicts with the right timing of the summer crop as follows: rice (transplanted more risky on that criteria than direct seeded), aerobic rice, maize and soybean. This classification is maintained in the three locations studied (data not shown). The most constraining location on that criterion was found to be Phu Ho, followed by Van Chan and Mu Cang Chai.

3.3.2. Risk of crop failure due to cold temperature periods

As expected, the virtual experiment showed that the risk of crop destruction by periods of excessively cold temperature increased with elevation and decreased as sowing date takes place later in the year, at a given location and for a given crop. Figure 5b provides an example of the effect of sowing date and elevation on the probability that the crop is not destroyed by low temperatures (P2), in the case of irrigated rice, the crop with the longest crop cycle and the highest sensitivity to cold events, at Phu Ho. For each location, crop and elevation, there was an interval of sowing dates for which P2 is greater than 80%.

Figure 6b presents the size of this interval as depending on crop and elevation at Phu Ho. Rice appeared to be the most risky considering this probability, without difference between direct seeded and transplanted rice, aerobic rice being slightly less risky. Maize and Soybean appeared equally less risky than rice. The most risky location was, as for the criteria of P1, Phu Ho, followed by van Chan and Mu Cang Chai (data not shown).

3.3.3. Risk of low yield due to low radiation and temperature

Figure 5c provides an example of the effect of sowing date and elevation on the probability (P3) that yield is greater than 70% of the maximum yield simulated over all tested sowing dates. In the case of this criteria, the risk of low yield increases with elevation and from late to early sowing dates. For each crop, location and elevation, an interval of sowing dates for which P3 was higher than 80% was obtained in the simulations. Figure 6c presents the size of this interval as depending on crop and elevation at Phu Ho. In Van Chan and Mu Cang Chai, whatever the crop, the risk of low yield had very little influence on the duration of the favourable sowing period except for very high elevation of above 800m (data not shown). Under the climate of Phu Ho, whatever the elevation the risk of reduced yield was the lowest for soybean, followed by maize and then rice.

3.3.4. Length of the favourable window for sowing a spring crop

The preceding results confirmed that a sowing period favourable to spring crop (FWS) should combine the criteria of a date of crop maturity compatible with the proper timing of summer rice, of avoiding crop failure due to cold temperature, and of achieving a relatively high yield. The simulated probabilities of satisfying the two first criteria a given year, P1 and P2 respectively, decreased with increasing sowing date, whereas the simulated probability of satisfying the third criteria, P3, increases with increasing sowing date. FWS (defined in the section 2.5) is shown in figure 7 per location, elevation and crop. FWS decreased with increasing elevation. Under the climate of Phu Ho (Figure 7a), FWS reaches zero at elevations above 400m and 600m for rice and maize respectively, while the climates of Van Chan and (Figure 7b), Mu Cang Chai (Figure 7c), are less constraining for spring crops, with

FWS of maize reaching zero above 800 and 1000 m respectively, and FWS of directly sown or aerobic rice reaching 0 at 800 and 1000 m respectively.

For each of the three locations, soybean was the crop with the longest sowing period with reasonable risks relative to the three criteria, even at an elevation of 1000m. At such high elevation, FWS of soybean was 20 days, 50 days and 70 days at Phu Ho, Van Chan and Mu Cang Chai respectively. At an elevation of 600m, where arable and irrigable land is commonly found in the mountains of Vietnam, FWS of soybean was 80 days in Van Chan and Mu Cang Chai, and 50 days at Phu Ho. Growing maize as a spring crop was found more constraining as at the same elevation of 600m, FWS of maize was 0, 50 and 60 days at Phu Ho, Van Chan and Mu Cang Chai, respectively. Rice was even more constraining, especially if transplanted, with FWS of transplanted rice at a given elevation and location being 20 to 60 days lower than that of maize. At most locations and elevations, FWS of direct seeded and aerobic rice (also direct seeded) could not be distinguished, and otherwise showed little difference. The FWS of these two crops were 10 to 30 days greater than that of transplanted rice in most locations and elevations.

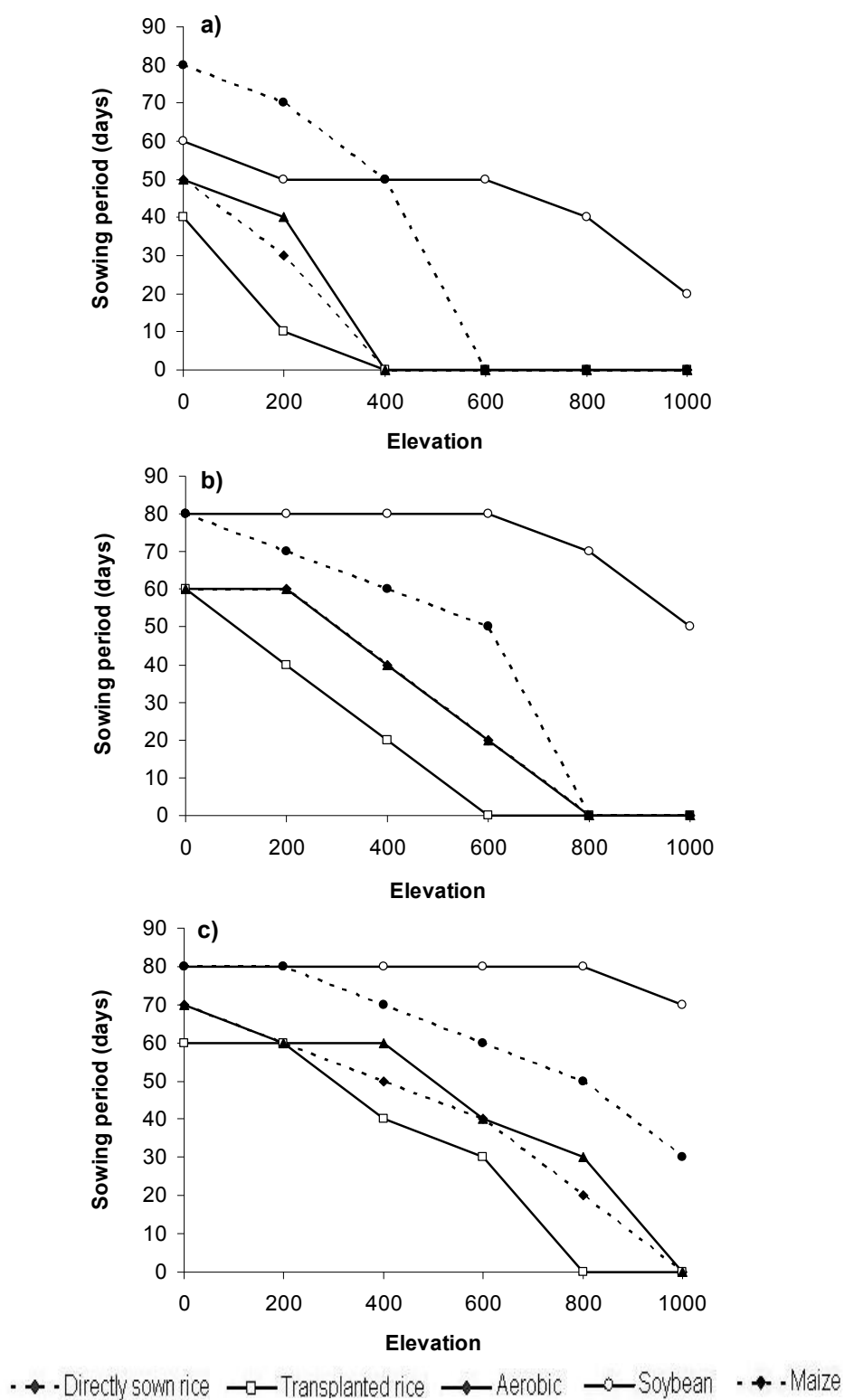


Figure 7: Length of favourable window for sowing (sowing period during which P1, P2 and P3 are over 80%, in days) related to elevation at a) Phu Ho; b) Van Chan; and c) Mu Cang Chai.

4. DISCUSSION

The TRYSim model was calibrated using experimental data over two years at two locations and at different elevations, considering different sowing dates and planting techniques for irrigated rice, taking into account the diversity of temperature and radiations conditions found in the northern highlands of Vietnam during spring. Although the experiments were set up under controlled conditions aiming at avoiding any water, nutrient or biotic stress, some plots failed to satisfy to these criteria, due to logistical constraints in the mountainous region of our study. Lobell et al. (2009) mentioned this issue as common in studies of this kind in their review of methods by for estimating yield gaps and potential yields.

Model calibration enabled us to obtain satisfactory simulations in terms of simulated crop duration, LAI, above ground biomass and grain yield, when assessed against our experimental data. Our experimental device with crops exposed to particularly contrasted temperature, and the use of the classical thermal time approach in TRYSim made our simulations of crop duration particularly reliable for the cultivars used in our study. However thermal time constants will have to be determined for any other cultivar to which our simulation approach would be applied. Water running in irrigated fields in the highlands of Vietnam may be of a slightly different temperature than air measured in weather stations in some particular places, and this is expected to change crop duration and affect yield (Shimono et al., 2002) in a way that was not accounted for in our simulations. Ebmax values obtained in our study for maize and irrigated rice (3.8 and 3.3 g.MJ⁻¹, respectively) were in agreement with values found by other authors using similar models around 3.8 and 3.2 g.MJ⁻¹ for maize and irrigated rice respectively (Horie and Sakuratani, 1985; Brisson et al., 1998; Idinoba et al., 2002; Confalonieri et al., 2009). Yet, the calibrated value obtained for soybean was low compared to the value obtained by Brisson et al. (2001), 1.8 vs. 2.5 g.MJ⁻¹ respectively, but in the same order of magnitude than the results obtained by Singer et al. (2010). This suggests that despite our efforts, the growing conditions established in our experimental plots for soybean were not perfectly free of water, nutrient or biotic stress. With our calibrated parameters, TRYSim may thus underestimate the potential yield of soybean. This does not affect the reliability of our assessment of the favourable sowing dates for spring soybean since we used the yield relative to the maximum simulated yield at a given location and elevation, and not the yield itself as an indicator of the radiation-related constraint. In the case of aerobic rice, the calibrated value was 2.6 g.MJ⁻¹, consistent with those from Bouman et al. (2006), ranging 2.09 - 2.53 under flooded conditions.

The parameters relative to the cold-related destruction of the crop were set at values found in the literature. However, some authors suggest that the sensitivity of crops to irremediable damages from low temperature is cultivar dependent and there are

discrepancies between the values proposed by Lou et al. (2007). An overestimation of the sensitivity of the studied cultivars would likely have been detected in our experiment, since it would have resulted in the model predicting inadequately the destruction of the plots exposed to the coldest temperatures. But we cannot discard the possibility that our parameterization led to underestimating the risk of crop destruction due to low temperature. Refining this aspect of the model and of the related criteria in the virtual experiment would require a specific experiment carried out in which crops are exposed for various durations to a range of temperatures below the range covered during our calibration experiment.

The virtual experiment showed that low temperature and radiation do constrain the feasibility of a spring crop in some environments of the mountains of Vietnam. The most constraining issue, whatever the crop and location among those we tested, was shown to be the risk that low temperatures delay the completion of the crop's cycle so that the setting of the subsequent summer rice cannot be carried out at a proper time. We assumed a date after which the setting of the summer rice was not acceptable. This approach proved effective for showing the variability of the constraint of crop duration across crops, locations and elevations, and thus for identifying the most favourable and unfavourable environments for introducing a spring crop. However, in intermediary situations, a more in depth analysis of the economic soundness of introducing a spring crop would be useful. It would require that the total yield (and economic return) obtained over the year with the sequence of two crops, accounting for possible delays in sowing or transplanting the summer rice, is compared to the yield and economic return of the sole summer cycle set at its optimal date. This would be possible by applying our virtual experiment approach to the sequence of the two crops instead of the sole spring crop.

The risk of crop failure due to periods of consecutive days with lethally low temperature and the negative impact on yield of low solar radiation and low temperature are not as constraining as the increase in crop duration, but they cannot be neglected in some environments, especially for rice and maize. Our approach of combining criteria in the definition of a favourable window for sowing was well adapted to the objective of identifying the diverse influences of solar radiation and temperature on the feasibility of introducing a spring crop. This approach is similar to that of a 'window of opportunity' for sowing proposed by Kouressy et al. (2008) in their virtual experiment for evaluating the adaptation of sorghum cultivars to contrasted environments.

Nevertheless, other factors not accounted for in this study may reduce or enhance the feasibility of spring crops. First, water availability in the earliest part of the season may be low in some areas and this can further reduce the window of opportunity for sowing a spring crop. In order to assess the spatial and temporal distribution of this constraint, the approach used in the present study would deserve to be repeated using a water balance model coupled to

TRYSim. Second, the use of a plastic tunnel greenhouse during nursery period of transplanted rice may reduce the risk of crop destruction and allow earlier transplanting (Sipaseuth et al., 2007). The extent to which this increases the duration of the favourable period for sowing would also deserve to be studied, especially in areas where the irrigation system is not of sufficient quality to allow direct seeding of rice.

5. CONCLUSION

The model TRYSim proved suitable for evaluating the impact of temperature and solar radiation on crop duration, LAI, above ground biomass and yield of maize, rice (under transplanting and direct seeding management) and soybean under conditions free from water, nutrients and biotic stresses. The principles of our experimental device were adapted to the calibration of such model. Yet, maintaining growing conditions corresponding to those of the potential yield remains challenging and was not fully achieved, in our study, in the specific case of soybean.

The study showed that using the currently recommended cultivars, growing rice and maize during spring may be clearly risky under some environments, mostly due to increase in crop duration that hampers the proper timing of the main summer rice, but also due to crop destruction by severely cold temperatures at the beginning of the season. Soybean appeared to be less risky as an option in non water limited environments.

We defined a virtual experiment and a favourable window for sowing based on the several ways temperature and radiation affect yield. This approach proved effective to identify favourable and unfavourable environments for introducing a spring cycle in the mountains of Vietnam, in order to help better targeting the policy in support to the introduction of a spring crop. Options to refine the approach are to better calibrate the parameters related to the sensitivity of crops to severely low temperature to account for possible changes in the sowing date of the summer rice and their impact on the economic return of the spring-summer crop sequence compared to that of a sole summer crop. Water stress related constraint and the effects of plastic tunnel greenhouses on the window of opportunity for sowing should also be studied in future research in order to be included in the model.

Chapitre 3. Contraintes hydriques pour la culture de printemps dans les systèmes de culture des terres irrigables des montagnes du Nord du Vietnam

1. Introduction

L'eau est un facteur clé de la production des céréales comme le riz, le maïs, ou le blé. En conditions irriguées, les rendements de ces cultures atteindraient près de 80 % du potentiel de rendement, alors qu'ils atteignent moins de 50 % en culture pluviale (Lobell et al., 2009). En riziculture tropicale, d'après Bouman et al. (2005), le rendement moyen des variétés de riz en condition aérobie est réduit de 32 % pendant la saison sèche (790 - 1 430 mm) et de 22 % en saison humide (1 248 - 1 880 mm).

Les vallées de montagne du nord du Vietnam sont soumises à des conditions de température variées en relation avec les variations d'altitudes et d'exposition. La pluviométrie est de l'ordre de 1 800 à 2 000 mm an⁻¹, et varie selon la localisation (Nguyen Thanh Son, 2005; Doan Van Diem et al., 2008). L'ensemble de la région connaît deux saisons climatiques : l'été et le printemps. L'été, ou saison des pluies, de juin à octobre fournit 68 % des précipitations annuelles, avec une température moyenne journalière de 25 à 32 °C, c'est la saison favorable au riz irrigué. Par contre, le printemps, de janvier à juin est plus froid, avec une température moyenne variant de 16 à 27 °C, et souvent inférieure à 20 °C au début de la saison (figure 2, chapitre 1). La pluviométrie est aussi un facteur important (figure 2, chapitre 1) : de janvier à juin, la moyenne sur trois localités représentatives des climats des montagnes du nord du Vietnam, est de 442 mm, soit 28 % du cumul annuel. Pendant la période de la phase végétative de la culture de printemps, de février à mai, les précipitations se réduisent à seulement 26 % du cumul annuel.

Une part importante (64 % de la surface) des rizières irrigables en été est également irrigable au printemps sans contrainte particulière de disponibilité en eau. Pour ces terres irrigables au printemps, il existe des risques que la température et le rayonnement réduisent les rendements ou retardent la maturité du cycle de printemps au-delà de la date où le riz d'été doit être mis en place (Quyen Luu Ngoc et al., soumis). Dans le chapitre 2 nous avons appliqué une première fois la démarche de cette thèse, ce qui nous a permis de repérer les régions climatiques, les altitudes et les dates de semis où les risques de cette nature sont faibles pour les cultures de riz irrigué, de riz « aérobie », de maïs et de soja. Cependant, dans le cas où l'irrigation n'est pas praticable au printemps, la pluviométrie est-elle suffisante pour réaliser des cultures pluviales telles que le riz aérobie, le soja, et le maïs ? En regard de la disponibilité en eau, la modélisation agroclimatique fournit un cadre d'analyse de

l'interaction culture – environnement et peut permettre d'améliorer d'une part la prévision de croissance et de rendement, et d'autre part l'évaluation des risques (Boote et al., 2001).

Le but de notre étude est d'évaluer la façon dont le facteur hydrique se combine avec les facteurs température et rayonnement pour contraindre les cultures pluviales au printemps. Pour cela, un modèle de simulation de culture, WaTRYSim (WATER, Temperature and Radiation-limited Yield SIMulator) a été développé et calé à l'aide d'un dispositif expérimental. Il a ensuite été utilisé pour simuler des cultures virtuelles de riz aérobie, soja, et maïs, en fonction de conditions de pluviométrie, température et rayonnement enregistrées pendant plus de 10 ans dans les vallées de montagne du Nord du Vietnam.

2. Matériels et méthodes

2.1. Le modèle utilisé

2.1.1. Description générale du modèle

Le modèle utilisé, WaTRYSim, a été écrit en VBasic pour Microsoft Access, de manière à faciliter les expérimentations virtuelles en suivant les principes d'interfaçage entre modèles et bases de données tels que décrits par Affholder et al. (2012).

Le modèle simule la croissance et le rendement potentiels tels que définis par Lobell et al. (2009), c'est-à-dire pour des conditions idéales où la culture serait maintenue exempte de tout facteur limitant autre que la température, le rayonnement global et les précipitations, et en considérant une densité de peuplement de référence. WaTRYSim fonctionne au pas de temps journalier. Les variables principales simulées sont les dates de levée et de maturité, l'indice de surface foliaire (LAI), la biomasse aérienne totale, le rendement en grains, la profondeur atteinte par les racines, le stock utile d'eau dans la zone colonisée par les racines (Strac), la fraction d'eau transpirable (FTSW « Fraction of Transpirable Soil Water »), l'évaporation du sol, la transpiration et le drainage sous la zone racinaire. Le bilan hydrique du sol est basé sur la classique approche « réservoir » de Van Keulen (1981). Plus précisément, il emprunte largement au modèle SARRA de Forest and Clopes (1994) et Affholder (1997) qui fournit des estimations robustes de Strac et FTSW sous cultures de céréales en environnement semi-aride et subhumide par Affholder (1995; 1997). La simulation du développement et de la croissance de la culture en l'absence de stress hydrique est largement empruntée au modèle STICS de Brisson et al. (2002) et a été décrite en détail par Quyen Luu Ngoc et al. (soumis). La phénologie et le LAI en absence de stress sont déterminés par le temps thermique. Un taux de croissance potentielle (dBiom0) est calculé en fonction du rayonnement photosynthétiquement actif intercepté (RAINT), de la température moyenne de l'air, et d'un coefficient de conversion maximal du rayonnement (Ebmax) :
$$\text{dBiom0} = (\text{Ebmax} * \text{RAINT} - 0.0815 * \text{RAINT}^2) * F(T) \quad (1)$$

où $F(T)$ est une fonction parabolique de la température utilisant des paramètres spécifiques de la culture : la température minimale (T_{\min}), optimale (T_{copt}) et maximale (T_{\max}) pour l'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse.

En conditions de contrainte hydrique, les valeurs potentielles de la croissance quotidienne du LAI et de la biomasse sont toutes deux multipliées par un coefficient de stress hydrique, évoluant selon une fonction bilinéaire de FTSW avec un seuil, conformément au bulletin d'irrigation et de drainage de la FAO numéro 56 (Allen et al., 1998).

Le rendement en grains est calculé selon l'approche de l'indice de récolte (HI) couplée à une limitation par les puits (Brisson et al., 1998). HI est d'abord calculé au cours du stade de remplissage du grain avec un taux d'accroissement, vitircarb , et une valeur maximale de HI, HI_{\max} . Les paramètres HI_{\max} et vitircarb , dépendent tous deux de l'espèce cultivée. Le rendement en grains est ensuite calculé comme le minimum entre la valeur résultant de ce calcul et le produit du poids maximal d'un grain pour l'espèce par la valeur simulée du nombre de grains par unité de surface (Ngrain). Ngrain est obtenue selon une fonction linéaire de Vitmoy , le taux de croissance moyen simulé pendant la phase de floraison :

$$\text{Ngrain} = \text{Cgrain} * \text{Vitmoy} + \text{CgrainV0} \quad (2)$$

Les paramètres Cgrain et CgrainV0 sont dépendants de l'espèce cultivée.

2.1.2. Description détaillée du modèle de bilan hydrique

2.1.2.1. Réservoirs considérés

Le modèle intègre quatre sous-réservoirs dont deux de taille variable en fonction de la croissance racinaire :

- un réservoir concerné par l'évaporation et la transpiration de surface (Stsurf), de profondeur Zsurf (cm) ;
- un réservoir destiné au calcul de la levée de la culture, Stger , de profondeur Zger ;
- un réservoir de la couche de sol colonisée par les racines (Strac) dont la capacité augmente avec la profondeur atteinte par les racines Zrac . La capacité de ce réservoir évolue au cours du temps avec la croissance racinaire qui peut atteindre une valeur maximale Zrac_{\max} ;
- un réservoir dans la couche de sol non colonisée par les racines, allant de la profondeur Zrac jusqu'à la profondeur maximale de sol considérée (Ztotsol). Ce réservoir peut être subdivisé en deux sous-réservoirs : le premier, Stnonrac , de capacité variable en fonction de la croissance de Zrac jusqu'à Zrac_{\max} , et le second, Stprofond , de capacité fixe et correspondant à la couche de sol entre Zrac_{\max} et Ztotsol .

De ce fait, le stock hydrique total disponible StockSol de 0 à Ztotsol correspond aux trois réservoirs suivants : $\text{StockSol} = \text{Strac} + \text{Stnonrac} + \text{Stprofond}$.

Le modèle ne considère qu'une seule valeur moyenne de la capacité de stockage en eau du sol par volume élémentaire de sol, valable pour ces trois réservoirs. Exprimée en hauteur d'eau par cm d'épaisseur du sol, ce paramètre TAW du sol est donné par :

$$\text{TAW} = (\text{Hcc} - \text{Hmin}) * \text{da} \quad (3)$$

Où :

- Hcc : teneur en eau pondérale à la capacité au champ (g eau/g sol) ;
- Hmin : teneur en eau pondérale au point de flétrissement (g eau/g sol) ;
- da : densité apparente.

Pour chaque réservoir, le stock est actualisé chaque jour en ajoutant au stock du jour précédent les apports d'eau, c'est-à-dire le drainage sous le réservoir immédiatement supérieur ou, pour les réservoirs de surface et Strac, la somme des pluies et des irrigations éventuelles. Si le stock ainsi obtenu excède le produit $\text{TAW} * \text{épaisseur du réservoir}$, l'excédent est affecté au réservoir inférieur (c'est-à-dire au drainage profond dans le cas de Stprofond) et le stock du réservoir est égal à la capacité totale de Stprofond. Lorsque les racines croissent d'une quantité DeltaZrac et si Stnonrac n'est pas nul, Strac est également augmenté d'une quantité $\text{DeltaZrac} * \text{TAW}$. Enfin, le stock est actualisé en retranchant la transpiration et l'évaporation. L'évaporation est affectée à Strac et Stger au prorata des épaisseurs Zrac et Zger de ces réservoirs, comparées à Zsurf lorsque Zrac ou Zger sont inférieures à Zsurf. De même, la transpiration est affectée à Stsurf et Stger au prorata de Zsurf et Zger par rapport à Zrac quand Zsurf ou Zger sont inférieures à Zrac.

En sol de rizière, une couche de sol fortement compactée est en général entretenue pour constituer le plancher imperméable de la rizière. Dans le cas d'une couche fortement compactée ($> 1.57 \text{ Mg/m}^3$) de 15 à 60 cm de profondeur, la profondeur racinaire maximale atteint 60 cm pour le maïs (Laboski et al., 1998; Chen and Weil, 2011) et 50 cm pour le soja (Calonego and Rosolem, 2010). Pour simuler l'influence de cette couche compactée sur la croissance racinaire, nous avons introduit un paramètre ZObstacleRac, profondeur d'un éventuel obstacle à la croissance racinaire, au-delà duquel Zrac n'augmente plus si $\text{Zracmax} > \text{ZobstacleRac}$.

2.1.2.2. Calcul de l'évaporation du sol

L'évaporation potentielle du sol (Eos) est calculée en fonction de l'évapotranspiration potentielle ETP, calculée par l'équation de Penman-Monteith telle que décrite par Allen et al. (1998) et du LAI (équation 4) issu de Brisson et al. (2002) :

$$\text{Eos} = \text{ETP} * \exp(-(\text{Kext} - 0.2) * \text{LAI}) \quad (4)$$

avec K_{ext} , extinction du rayonnement de la culture.

L'évaporation réelle du sol (E_s) est calculé par l'équation (5), dans le cas d'une contrainte hydrique dans l'horizon de surface W_{surf} , avec $W_{surf} < SeuilEs$ (seuil de contrainte hydrique limitant l'évaporation du sol de surface) :

$$E_s = E_{os} * W_{surf} / SeuilEs \quad (5)$$

$$\text{et } W_{surf} = St_{surf} / TAW * Z_{surf}$$

S'il n'y a pas de contrainte, alors $E_s = E_{os}$.

2.1.2.3. Calcul de la transpiration de la culture

La transpiration maximale de la culture (E_{op}) est calculée par l'équation (6) issu de Brisson et al. (2002) :

$$E_{op} = (E_o - E_{os}) * (1.4 - (0.4 * E_s / E_{os})) \quad (6)$$

Où : E_o est l'évapotranspiration potentielle de la culture $E_o = ETP * K_c$, avec K_c : coefficient cultural ; $K_c = 1 + ((K_{max} - 1) / (1 + \exp(-1.5 * (LAI - 3))))$; K_{max} : coefficient cultural maximal ;

En cas de stress hydrique (W_{stress}), la transpiration réelle de la culture (Tr) est calculée selon l'équation (7) :

$$Tr = E_{op} * W_{stress} \quad (7)$$

si $FTSW > P_{factor}$, alors $W_{stress} = 1$

si non, alors $W_{stress} = FTSW / P_{factor}$.

Où :

- $FTSW = Strac / (TAW * Z_{rac})$;
- P_{factor} : seuil d'action de la contrainte hydrique sur la transpiration de la culture.

2.1.3. Simulation de l'effet d'un stress hydrique sur la croissance de culture

2.1.3.1. Germination et levée

Les principaux déterminants de la germination des graines et de la levée sont la température et la teneur en eau du sol (Helms et al., 1996; Rinaldi et al., 2005), la teneur en eau du sol de surface étant le facteur prépondérant (Rahmianna et al., 2000).

En condition non limitante en eau, le modèle considère que la levée intervient quand le temps thermique accumulé (calculé en utilisant la température de l'air et une température de base pour la levée T_{ger}) atteint une constante thermique de germination - levée CTL (Garcia-Huidobro et al., 1982; Rinaldi et al., 2005). Le taux de remplissage du réservoir St_{ger}

intervient en stoppant l'accumulation de temps thermique lorsque $Stger/(TAW \cdot Zger)$ devient inférieur à un seuil $bGer$ et tant qu'il ne repasse pas au-dessus d'un autre seuil $aGer$.

2.1.3.2. LAI et biomasse

Conformément à l'approche suivie dans STICS de Brisson et al. (2002), notre modèle considère deux facteurs de réduction de la croissance de la culture au stress hydrique, $Turfac$ et $WSfact$, agissant respectivement sur le LAI et la biomasse :

$$LAI = dLAI_0 \times Turfac \text{ et } Biom = dBiom(0) \times WSfact \quad (8)$$

Où : $dLAI(0)$ est le croît journalier de LAI en absence de stress.

$Turfac$ est obtenu par la relation suivante : Si $FTSW > (1 - SeuilTurg)$, alors $Turfac = 1$; si $FTSW < (1 - SeuilTurg)$, alors $Turfac = FTSW / (1 - SeuilTurg)$. $SeuilTurg$ est le seuil d'effet de la contrainte hydrique sur la croissance du LAI.

La même relation est utilisée pour le calcul de $WSfact$ en remplaçant $SeuilTurg$ par le paramètre de la sensibilité de la croissance de la biomasse au stress hydrique, $SeuilWS$.

2.2. Le dispositif expérimental

Au Chapitre 2, le modèle TRYSim a été correctement calé du point de vue du développement, de la croissance et du rendement, pour des conditions en l'absence de stress hydrique. Dans le présent chapitre, nous cherchions à créer des situations culturales soumises à des stress hydriques, de manière à procéder au calage des composants de modèle dont l'ajout à TRYSim a conduit au modèle WaTRYSim.

Le dispositif correspondant à cet objectif a été construit dans les mêmes localités (Phu Ho et Suoi Giang) que le dispositif du chapitre 2, et en suivant les mêmes principes, c'est-à-dire la recherche de situations contrastées du point de vue des principales variables explicatives considérées par la partie du modèle à caler. Dans le chapitre 3, nous nous sommes limités aux cultures pluviales (riz «aérobie», maïs et soja).

2.2.1. Expérimentations

Pour tous nos essais, nous avons utilisés les trois cultivars suivants, considérés comme les mieux adaptés actuellement à la culture de printemps dans les montagnes du Vietnam d'après Le Quoc Doanh et Luu Ngoc Quyen (2007) le cultivar de riz aérobie IR74371, le cultivar de soja DT84, le cultivar de maïs LVN99 (Hybride F1).

Les expérimentations consistaient à établir des situations culturales qui soient aussi proches que possible des conditions de croissance où seuls les éventuels stress hydriques, le rayonnement et la température influencent la croissance et le développement de la culture. Ces situations étaient conduites avec une fertilisation N-P-K égale à 100-100-80 et 10 t/ha de fumier pour le riz et riz aérobie ; 30-60-60 et 8 t/ha de fumier pour le soja ; 160-90-

90 et 10 t/ha de fumier pour le maïs. Les parcelles faisaient l'objet de désherbages méticuleux et répétés, d'une surveillance phytosanitaire régulière et de traitements phytosanitaires appropriés. Quelques irrigations étaient éventuellement pratiquées pour garantir la survie de la culture en cas de conditions de pluviométrie particulièrement contraignante. En faisant varier la localité, l'altitude, l'année et la date de semis dans l'année, nous avons cherché à placer ces situations culturales dans des conditions contrastées de température, de rayonnement et de pluviométrie représentatives du printemps dans les montagnes du Nord du Vietnam.

Sur le site de Phu Ho, le terrain choisi est une parcelle exondée sur sol ferrallitique profond. Dans le cas de Suoi Giang, il s'agissait de parcelles de terrasses aménagées en rizières, dans lesquelles l'irrigation n'était pas fonctionnelle au printemps, mais caractérisées par la présence d'un plancher imperméable de rizière à 40 cm de profondeur.

Chaque situation culturale considérée ici est définie par l'espèce cultivée (avec le cultivar choisi pour cette espèce), l'année, la date de semis dans l'année et la localité. Chacune de ces situations culturales était répétée trois fois en parcelles élémentaires de 15 à 30 m². L'agencement des placettes formait chaque année un dispositif en bloc randomisé pour chaque culture, à trois répétitions pour le facteur date de semis dans l'année.

Dans chaque site on disposait d'une station météorologique automatique (CIMEL) fournissant les valeurs minimales, maximales et moyennes journalières de la température de l'air (T), ainsi que le cumul journalier du rayonnement global et de la pluviométrie. En outre, des thermomètres enregistreurs (Votcraft DL-120) ont été mis en place sous abri ventilé à proximité immédiate de chaque site du dispositif, ainsi que des pluviomètres.

2.2.2. Mesures et observations

L'humidité pondérale du sol (g d'eau/g de sol, Ws) a été mesurée par prélèvement de sol à la tarière tous les 20 cm jusqu'à 1 m de profondeur avec une fréquence de 15 jours jusqu'à la phase remplissage du grain. Pour chaque intervalle de profondeur, le sol prélevé a été mélangé pour obtenir un échantillon homogène, représentatif de l'humidité dans cette tranche. Les échantillons étaient conservés dans des boîtes soigneusement fermées. Au laboratoire, ils étaient pesés puis placés à l'étuve pour séchage à 105 °C pendant 48 h.

L'humidité du sol au point de flétrissement (g eau/g sol, Hmin) a été estimée pour chaque parcelle et chaque profondeur tous les 20 cm jusqu'à 1 m en prenant la valeur la plus basse de l'humidité mesurée par gravimétrie au cours de la saison de culture.

La capacité au champ (Hcc) a été mesurée pour chaque site en deux répétitions distantes de 100 m par la méthode conventionnelle du double anneau de Klimet Smith (NISF, 1998). Les deux anneaux en fer (diamètre anneau externe : 15 cm ; diamètre anneau interne : 12 cm ; hauteur de deux anneaux : 25 cm) sont placés à 5 cm de profondeur du sol.

De l'eau était introduite 9 ou 10 fois dans les deux anneaux jusqu'à saturation. Après 24 h, nous avons prélevé le sol à la tarière (de 0 à 1 m de profondeur) et mesuré l'humidité du sol.

Le stock hydrique utile mesuré sur le terrain (S_u , mm) est calculé par l'équation (9) :

$$S_u = S_w - \text{StocPF42} \quad (9)$$

Où :

- S_w : stock hydrique total (mm), $S_w = W_s * D_a * E * 10$; W_s : humidité pondérale mesurée (g/g) ; E : épaisseur de la couche d'échantillonnage (cm) ; D_a : densité apparente ;
- StocPF42 : stock hydrique au point flétrissement ; $\text{StocPF42} = h_{\min} * E * D_a$.

La densité apparente du sol a été mesurée par prélèvement de sol avec un cylindre de 100 cm³ de 5 à 100 cm de profondeur. Les échantillons ont été séchés à l'étuve à 80 °C pendant 48 h puis pesés. La densité apparente du sol (d) est calculée par l'équation : $d = M_s/V_s$ (M_s , masse du sol sec en g ; V_s , volume du sol en cm³).

Les stades phénologiques ont été observés sur chaque parcelle élémentaire tous les jours à Phu Ho et tous les 3 jours à Suoi Giang. Le LAI (Leaf Area Index) a été mesuré sur chaque placette d'essai à l'aide du LICOR-2000 à partir de 30 jours après la date de semis. A Phu Ho, il a été mesuré tous les 12-15 jours et à Suoi Giang tous les 15-20 jours.

En 2010, deux mesures de biomasse ont été effectuées au stade floraison et à la récolte de toutes les parcelles élémentaires. En 2011, les mesures ont été effectuées aux stades premier talle visible, début de floraison, pleine floraison, développement des grains et maturité des grains. Pour mesurer la biomasse, à chaque sous placette (toutes répétition de traitement), à chaque date de mesure, un échantillon de 5 plantes choisies au hasard a été collecté et séché à l'étuve à 80 °C pendant 48 h.

A la récolte, la biomasse totale, le rendement en grains, et les composantes du rendement (densité des plants, nombre épis par plante, nombre grains par plante, poids d'un grain) ont été mesurés pour chaque parcelle élémentaire ; un échantillon a été pris sur 1 m² pour le riz aérobie, et sur 3 m² pour le soja et le maïs.

2.3. Calage du modèle

Tous les paramètres communs aux modèles WaTRYSim et TRYSim ont été fixés aux valeurs calées dans le chapitre 2. Parmi les paramètres de WaTRYSim résultant des ajouts et modifications nécessaires à la simulation des contraintes hydriques et de leur impact sur le rendement, certains ont pu être fixés en recourant à la littérature (tableau 4).

Pour les paramètres propres aux cultivars utilisés ou aux sols de notre étude, et plus généralement pour tous les paramètres pour lesquels nous ne disposons pas d'estimation

valable dans la littérature pour les conditions de notre étude, nous avons recherché le meilleur ajustement entre les variables simulées dépendant de ce paramètre et les variables observées correspondantes pour minimiser la RRMSE (Relative Root Mean Square of Error). Nous avons effectué cet ajustement pour l'ensemble des situations culturales expérimentales (avec et sans stress hydrique) établies dans notre dispositif pendant les 2 années de son fonctionnement. En première étape, les paramètres Zsurf et SeuilEvap ont d'abord été calés de manière à ajuster les stocks hydriques simulés aux stocks observés pour la période (en début de saison) pendant laquelle le LAI des cultures était inférieur à 1. Cela permettait de considérer que l'évaporation jouait un rôle prépondérant sur l'évolution du stock hydrique par rapport à la transpiration. Dans les simulations de cette étape, la date de levée n'était pas simulée mais fixée aux valeurs observées.

En deuxième étape, il a été procédé au calage de la fonction simulant la date de levée par ajustement des dates de levée simulées aux dates observées. La constante thermique de germination - levée (CTL) a d'abord été obtenue pour chaque espèce en utilisant des situations expérimentales où le stock hydrique de surface du sol était resté élevé après semis. Les paramètres aGer et bGer ont ensuite été estimés en utilisant toutes les situations culturales du dispositif pour lesquelles les dates de levées avaient été observées avec une précision d'une journée.

En troisième étape, nous avons calé le paramètre Pfactor de sensibilité de la transpiration en forçant le modèle à passer par les valeurs observées de LAI (en agissant sur le paramètre dLAI_{max} pour chaque situation simulée) puis en ajustant le paramètre Pfactor à la teneur en eau du sol, de manière à réduire l'écart entre valeurs simulées et observées du stock hydrique pour l'ensemble des situations culturales.

En quatrième étape, le paramètre dLAI_{max} a été de nouveau fixé pour toutes les situations à la valeur obtenue dans le chapitre 2 par calage sur des situations sans stress hydrique. Puis, le paramètre SeuilTurg (sensibilité du LAI au stress hydrique) a été calé par ajustement des valeurs simulées aux valeurs observées de LAI au stade où le LAI est maximal (LAI_{max}).

En cinquième étape, le paramètre SeuilWS a été estimé de la même façon par ajustement des valeurs simulées aux mesures de biomasse aérienne.

Enfin pour les paramètres CgrainV0 et Cgrain de la fonction de calcul du poids de grain lorsque le nombre de grains est limitant (déjà estimés au chapitre 2), une nouvelle estimation par ajustement des nombres de grains simulés aux nombres de grains observés a été effectuée pour l'ensemble des situations du dispositif expérimental.

2.4. Simulation des scénarios

Afin d'évaluer la faisabilité d'une culture pluviale de printemps sous l'influence du stress hydrique, des scénarios de simulation ont été créés. Dans cette étude, comme dans le chapitre 2, on considère que les parcelles cultivables au printemps sont soumises à un climat régional représenté par les données de la station synoptique la plus proche, et que la température est modifiée par rapport à celle de cette station de référence en fonction de l'altitude à laquelle se trouve la parcelle (le long des versants montagneux, ou dans une vallée secondaire en amont ou en aval de la vallée principale où se trouve généralement la station synoptique). Pour tenir compte des effets de l'altitude sur la température, la correction utilisée est la même que pour le chapitre 2 : $T_z = T_0 - 0.6 (Z - Z_0) / 100$, avec T_z , température (°C) d'un niveau z (m) donné au-dessus du niveau de la mer, et T_0 , température d'une station météorologique donnée caractérisée par une altitude Z_0 .

De même, les scénarios de simulation incluent toutes les combinaisons possibles pour les 5 facteurs que nous avons considérés (tableau 1) : 1) la localisation de la station météorologique synoptique, représentative d'un climat régional du point de vue de l'évapotranspiration potentielle de référence, des précipitations, de la température à l'altitude de la station, et du rayonnement (trois stations : Phu Tho, Mu Cang Chai, et Van Chan) ; 2) le type de sol (sol ferralitique exondé sans limitation physique à la croissance des racines, et sol de rizière avec plancher imperméable à 40 cm de profondeur empêchant la croissance racinaire) ; 3) l'altitude de la parcelle cultivée (tous les 200 m de 0 à 1 000 m), influençant la température moyenne de l'air par rapport aux valeurs enregistrées à la station météorologique synoptique considérée ; 4) la culture (riz aérobie, soja, maïs) ; 5) la date de semis (tous les 10 jours, du 10^{er} janvier au 31 mars).

Les 3 stations météorologiques du réseau synoptique national vietnamien retenues pour cette étude sont soumises aux conventions de l'Organisation météorologique mondiale. Les séries de données qui étaient disponibles représentaient 10 années complètes parmi la série d'années de 1989 à 2002 pour les 3 localisations.

Nous avons défini un scénario comme une combinaison particulière des 5 facteurs listés ci-dessus. L'expérimentation virtuelle comprenait donc 900 scénarios. Chaque scénario a été simulé pour chacune des 10 années de la station synoptique considérée dans le scénario, de manière à appréhender la variabilité interannuelle des performances agronomiques des scénarios étudiés résultant de la variabilité climatique interannuelle. 9 000 simulations devaient donc être réalisées pour cette expérimentation virtuelle avec le modèle WaTRYSim.

Tableau 1: Combinaisons possibles pour les expérimentations virtuelles considérées.

| Facteur | Modalités | Nombre de modalités |
|---|--|---------------------|
| Climat Régional (Station climatique de référence et ses 10 années de données) | - Climat Froid : Phu Ho - Climat intermédiaire : Suoi Giang - Climat plus chaud : Mu Cang Chai | 3 |
| Altitude de la parcelle cultivée | Tous les 200m de 0 à 1000 m | 6 |
| Espèce (avec son cultivar le plus précoce disponible au Vietnam) | - Riz « aérobie » - Maïs - Soja | 3 |
| Profondeur de sol accessible aux racines | - Pas d'obstacle - Obstacle à 40 cm | 2 |
| Date de semis | Tous les 10 jours du 1 ^{er} janvier au 31 mars | 9 |

Nous avons ensuite analysé les scénarios simulés de manière à évaluer la façon dont la contrainte hydrique, en relation avec la température et le rayonnement, réduit la croissance de la culture. Si un stress hydrique entraîne un retard de levée, la durée du cycle de la culture sera prolongée. Afin que cette durée ne devienne pas une contrainte pour les cultures d'été, pour chaque scénario, nous avons calculé la probabilité (Q1) qu'une année parmi les années climatiques possibles, la maturité simulée intervienne avant la date du 5 juillet, considérée comme date butoir au-delà de laquelle la mise en place du riz d'été est trop tardive.

Nous avons aussi calculé l'influence du stress hydrique sur le LAI, la biomasse et le rendement en grains des trois cultures étudiées. Nous avons ainsi calculé la probabilité Q2 que le rendement simulé d'un scénario soit supérieur à 0.7 fois le rendement maximal atteint par les scénarios ayant en communs tous les facteurs sauf la date de semis. En outre, pour chaque scénario, une période favorable de semis a été définie par l'intervalle de dates de semis simulées pour lesquelles Q1 et Q2 sont toutes deux supérieures à 0.8.

3. Résultats

3.1. Caractéristiques des sols expérimentaux

Les caractéristiques de rétention en eau des sols des deux sites expérimentaux sont données dans le tableau 2 :

- le sol de Phu Ho - Phu Tho, zone d'étude de NOMAFSI, est sablo-limoneux, avec une couche de cailloux (roche mère) barrant la croissance racinaire à 130 cm de profondeur ;
- à Suoi Giang - Van Chan, le sol est limono-sableux de rizière avec un plancher imperméable à partir de 30-40 cm de profondeur.

Tableau 2 : Principales caractéristiques des sols des deux sites (Nord Vietnam).

| Site | Texture | Humidité à la capacité au champ (g eau/g sol) | Humidité au point de flétrissement (g eau/g sol) | Da (g/cm ³) | Profondeur d'obstacle racinaire (cm) | Source |
|------------|----------------|---|--|-------------------------|--------------------------------------|--------|
| Phu Ho | Sablo-limoneux | 22.2 | 14.0 | 1.05 | 130 | Mesure |
| Suoi Giang | Limono-sableux | 28.5 | 22.0 | 1.1 | 40 | Mesure |

3.2. Conditions hydriques des vallées de montagne du Nord du Vietnam

Les extrêmes de pluviométrie totale observés dans le dispositif expérimental du semis à la maturité ont été 101 et 576 mm pour le soja (durée du cycle la plus courte des trois cultures étudiées), 275 et 674 mm pour le maïs (durée du cycle intermédiaire), et 570 et 736 mm pour le riz aérobie (durée de cycle la plus longue). Par ailleurs, la variabilité illustrée par la figure 1 suggère que le dispositif expérimental a permis de disposer de situations culturales exposées à des conditions variées de pluies représentatives des conditions climatiques printanières dans les montagnes du Nord du Vietnam.

jours) : le modèle simule donc mieux l'influence du stress hydrique sur la durée de levée que celle de la température de l'air.

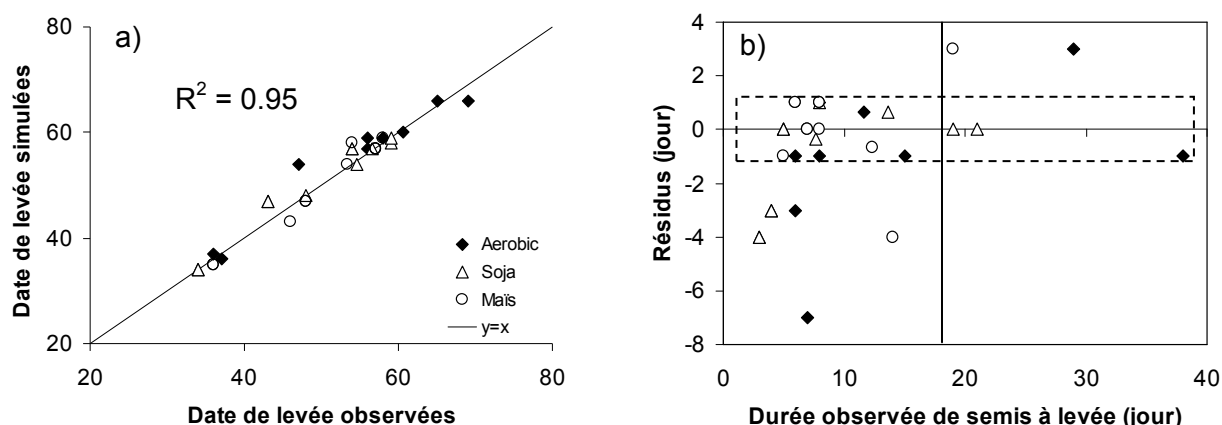


Figure 2: Evaluation du composant de WaTRYSim simulant la levée en fonction de la température et de la teneur en eau de la couche supérieure du sol. a) Comparaison des dates de levées simulées et observées (9 situations culturales pour le riz aérobic, 11 pour le soja et 11 pour le maïs). b) Distribution des résidus (écarts entre les valeurs simulées et observées de la durée entre semis et levée) en fonction de la durée observée entre semis et levée. La limite en pointillés indique les écarts compris entre -1 et +1 jour. La ligne verticale indique une durée de semis à levée supérieure à 19 jours.

3.3.2. Simulation du stock hydrique

En général, les dynamiques d'évolution du stock d'eau mesuré et simulé du sol (0-100 cm) ont montré une très bonne estimation par le modèle WaTRYSim du stock hydrique pour toutes les situations culturales créées (figure 3).

La figure 4 présente les valeurs observées et simulées des stocks hydriques de 0 à 100 cm, après calage du modèle et pour une sélection de situations culturales du dispositif expérimental. Les courbes de stock hydrique utile journalier simulées sont proches des données observées dans tous ces cas. Ces situations correspondent, pour chacune des trois cultures, aux deux situations les plus contrastées du point de vue de l'évolution du stock hydrique du sol au cours du temps. Il s'agit, d'une part de situations à stress hydrique intense et prolongé pendant toute la première moitié du cycle au moins (figure 4 a, c, e), d'autre part de situations où il y a eu peu ou pas de stress hydrique en début de cycle (figures 4 b, d, f). Des pluies relativement précoces et une baisse des précipitations pendant la phase reproductive de la culture entraînent des stress hydriques modérés à cette phase.

Dans ce qui précède, l'intensité et les périodes auxquelles se produisent les stress hydrique ont été déduites des valeurs simulées de FTSW après calage du modèle et compte tenu d'une valeur du paramètre Pfactor de 0.45, telle que la teneur en eau du sol limite la transpiration dès que FTSW est inférieur à 0.45, soit une sensibilité légèrement moindre de la transpiration au stress hydrique que dans Allen et al. (1998) qui donnent une valeur de Pfactor égale à 0.55.

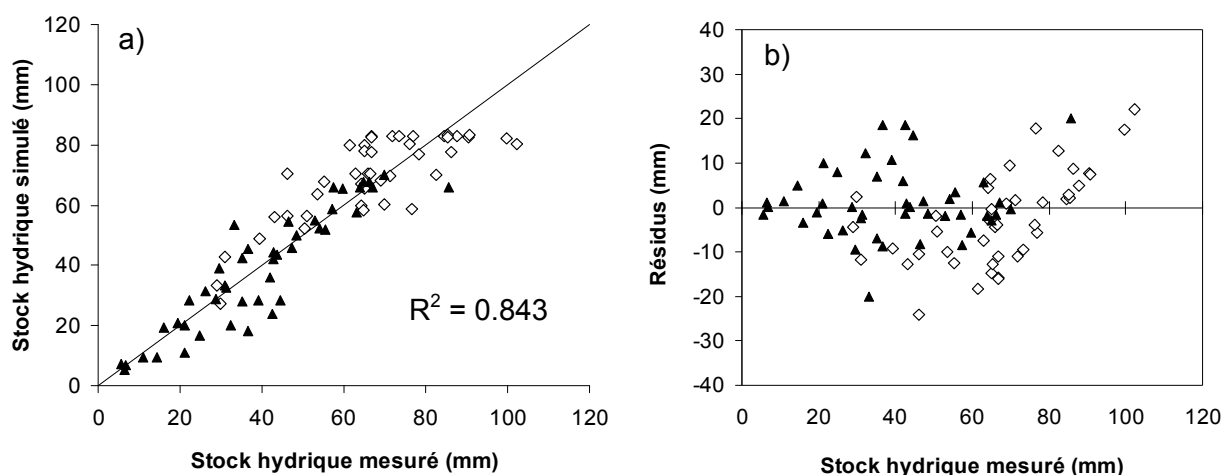


Figure 3: Comparaison du stock en eau du sol disponible (0-100 cm), simulé et mesuré en 2011 dans toutes les parcelles expérimentales des trois cultures pluviales pour les modalités sol non compacté (◇) et sol compacté à 40 cm de profondeur (▲). a) Relation entre le stock hydrique observé et simulé ($R^2 = 0.843$) ; b) Distribution des résidus (écarts entre les valeurs simulées et observées du stock hydrique) en fonction du stock hydrique mesuré.

3.3.3. Simulation du LAI

Dans les situations de fort stress hydrique avant le stade floraison, le LAI maximal atteint mesuré et simulé a été nettement inférieur aux valeurs mesurées et simulées pour les situations à faible stress hydrique pendant la phase végétative (figure 4). Le LAI maximal atteint observé pour les situations avec stress hydrique prolongé était de 2.3, 1.2 et 1.6 vs. 3.2, 4.9 et 2.9 pour les situations à faible stress hydrique, respectivement pour le riz aérobie, le soja et le maïs. Avec un calage à 0.45 du paramètre SeuilTurg, le modèle restitue correctement l'évolution observée des LAI au cours du cycle pour ces six situations (figure 4). Cela signifie que la FTSW réduit la croissance du LAI lorsque que $FTSW < 0.55$.

Concernant le LAI maximal atteint, l'évaluation du modèle, pour l'ensemble des situations culturales créées, indique que les estimations sont très satisfaisantes pour le soja et le riz aérobie avec respectivement 16.5 % et 11.8 % de l'erreur relative (RRMSE) entre les

valeurs observées et celles simulées, mais que l'estimation est moins bonne dans le cas du maïs où la RRMSE atteint 31.0 % (tableau 3).

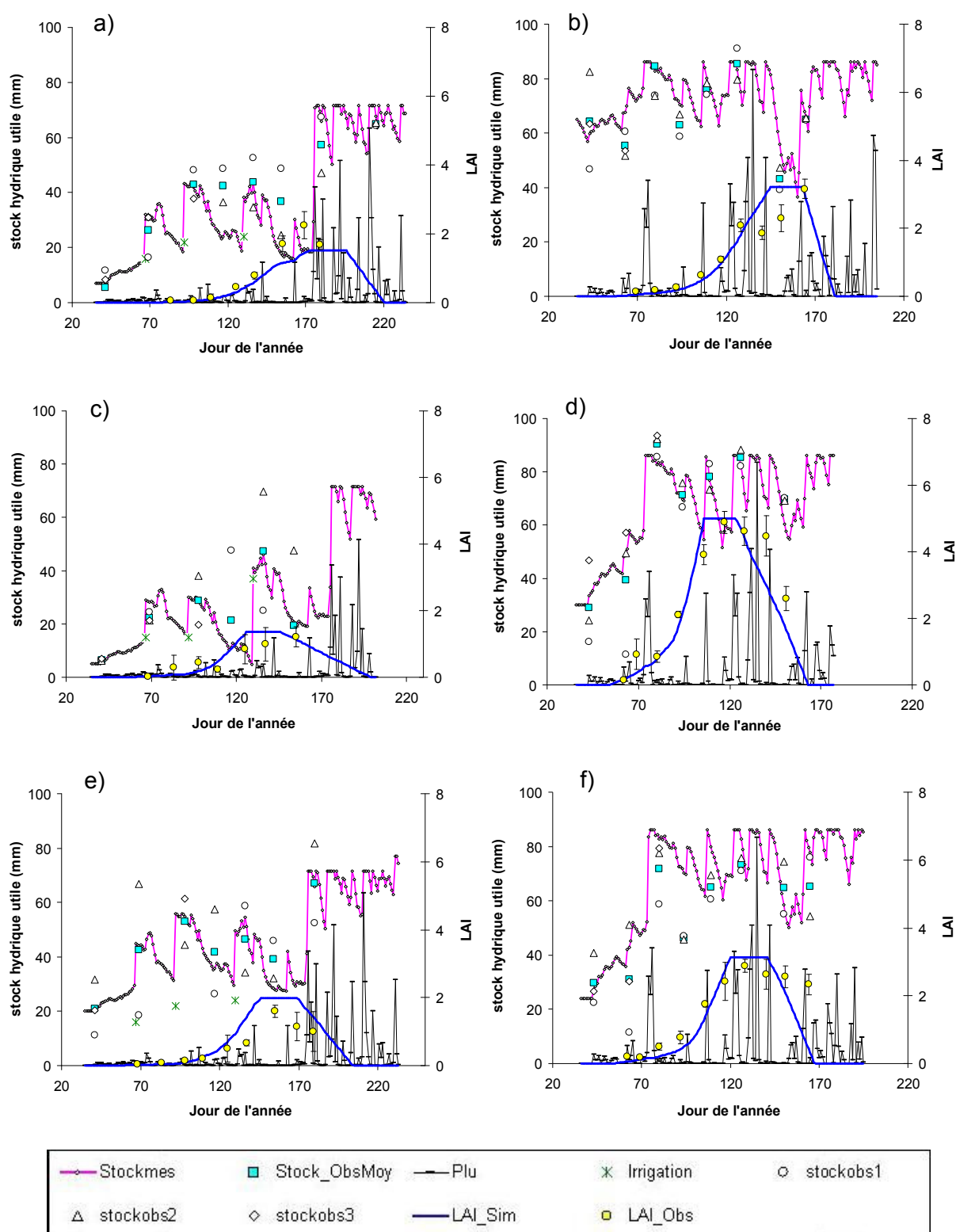


Figure 4: Stocks hydriques utiles simulés et observés (0 – 100 cm) à la deuxième date de semis DS2 (8-10 février) en 2011 pour les deux sites (Phu Ho et Suoi Giang). a) Riz aérobie à Suoi Giang. b) Riz aérobie à Phu Ho. c) Soja à Suoi Giang. d) Soja à Phu Ho. e) Maïs à Suoi Giang. f) Maïs à Phu Ho.

3.3.4. Simulation de la biomasse et rendement en grains

Après calage du paramètre seuilWS à 0.35, le modèle a bien estimé la biomasse du riz aérobie et du maïs, mais il est moins fiable pour le soja (écart moyen 0.56 t/ha ; RRMSE 21.2 %). Pour les trois cultures, la qualité des simulations du rendement en grain a été acceptable (tableau 3).

Tableau 3: Erreur relative de la simulation de LAI maximal, biomasse à la récolte et rendement en grains simulés par le modèle calé à partir de valeurs observées des trois cultures sur les deux sites expérimentaux. RMSE (root mean squared error) et RRMSE (relative root mean squared error).

| Culture | Variables | Unité de mesure | Nombre de situations culturales | Valeur moyenne observée | RMSE | RRMSE (%) |
|-------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------|-----------|
| Riz aérobie | Durée levée | jour | 9 | 14.3 | 2.8 | 19.8 |
| | LAI _{max} | m ² /m ² | 6 | 3.0 | 0.5 | 16.5 |
| | Biomasse à la récolte | t/ha | 6 | 6.64 | 1.22 | 18.4 |
| | Rendement en grain | t/ha | 6 | 2.38 | 0.27 | 11.5 |
| Soja | Durée levée | jour | 11 | 8.5 | 2.2 | 25.5 |
| | LAI _{max} | m ² /m ² | 5 | 3.34 | 0.4 | 11.8 |
| | Biomasse à la récolte | t/ha | 5 | 2.66 | 0.56 | 21.2 |
| | Rendement en grain | t/ha | 5 | 1.04 | 0.18 | 16.1 |
| Maïs | Durée levée | jour | 11 | 9.1 | 1.7 | 18.2 |
| | LAI _{max} | m ² /m ² | 5 | 2.26 | 0.7 | 31.0 |
| | Biomasse à la récolte | t/ha | 5 | 9.73 | 0.94 | 9.7 |
| | Rendement en grain | t/ha | 5 | 3.51 | 0.62 | 17.6 |

Tableau 4: Valeur des paramètres ajustés pour le modèle WaSTRYSim.

| Paramètre | Définition | Source | Valeurs de la culture | | |
|-------------|--|-------------|-----------------------|--------------------|----------------------|
| | | | Riz aérobie | Soja | Maïs |
| Kmax | Coefficient cultural maximal (avec ETP Penman) | Littérature | 1.2 ⁽¹⁾ | 1.2 ⁽¹⁾ | 1.4 ^(1,2) |
| Pfactor | Seuil d'action de la contrainte hydrique sur la transpiration | Calage | 0.45 | 0.45 | 0.45 |
| SeuilTurg | Seuil d'effet de la contrainte hydrique sur la croissance du LAI | Calage | 0.45 | 0.45 | 0.45 |
| SeuilWS | Seuil d'effet de la contrainte hydrique sur la croissance de la biomasse | Calage | 0.35 | 0.35 | 0.35 |
| DeltaRacMax | Croissance du front racinaire par unité de temps thermique (cm/°Cjour) | Calage | 0.08 | 0.1 | 0.16 |
| Zracmax | Cote maximale atteignable par les racines (m) | Calage | 1.0 ⁽³⁾ | 1.0 ⁽⁴⁾ | 1.7 ⁽⁵⁾ |
| Zger | Profondeur concernée par la levée (cm) | Calage | 15 | 15 | 15 |
| Tger | Température de base pour la germination et la levée (°C) | Calage | 8 | 7 | 6 |
| CTL | Constante thermique à la date de levée (degrés-jours) | Calage | 115 | 85 | 90 |
| aGer | Seuil de condition hydrique potentielle pour la germination | Calage | 0.14 | 0.14 | 0.14 |
| bGer | Seuil de contrainte hydrique de suspension la germination | Calage | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Cgrain | Coefficient empirique de croissance journalière du nombre de grains pendant la durée de remplissage des grains | Calage | 2 000 | 110 | 150 |
| Cgrainv0 | Nombre de grains mis en place si croissance nulle pendant la durée de remplissage des grains (grains /m ²) | Calage | -5 000 | 70 | -790 |

MS : Masse sèche ; (1) : FAO N° 56 de Allen et al. (1998) ; (2) : Modèle STICS (Scopel et al., 2004) ; 3 : Price et al. (2002) ; 4 : Merrill et al. (2002) ; 5 : Nicoullaud et al. (1995)

3.4. Scénarios de cultures de printemps sous contrainte hydrique

3.4.1. Risque d'une durée excessive du cycle, tenant compte d'éventuels retards de levée en fonction de la température et de l'état hydrique du sol

La figure 5 présente la probabilité Q1 que la maturité simulée de la culture intervienne avant le 5 juillet, en fonction de la date de semis, de l'altitude, pour la localité de Van Chan et les trois cultures pluviales étudiées. Le type de sol n'a pas d'influence dans notre expérimentation virtuelle sur la durée du cycle. La probabilité Q1 diminue avec l'altitude, ce qui était attendu du fait de la baisse de la température en fonction de l'altitude, et lorsque la date de semis devient plus tardive. Pour cette localité, nous voyons qu'il est impossible de cultiver à une altitude de plus de 600 m pour le riz aérobie, et de plus de 800 m pour le soja et le maïs, dans la mesure où même le semis le plus précoce conduit à une probabilité nulle d'atteindre la maturité avant le 5 juillet. Pour les autres localités étudiées, la probabilité Q1 diminue également avec l'altitude et lorsque la date de semis devient plus tardive (données non présentées). Par ordre décroissant de probabilité Q1 pour une altitude donnée, une date de semis donnée et une culture donnée, les localités se classent comme suit : Mu Cang Chai, Van Chan, Phu Ho. Par ordre décroissant de probabilité dans une localité donnée, une altitude donnée et une date de semis données, les cultures testées se classent comme suit : soja, maïs, riz aérobie.

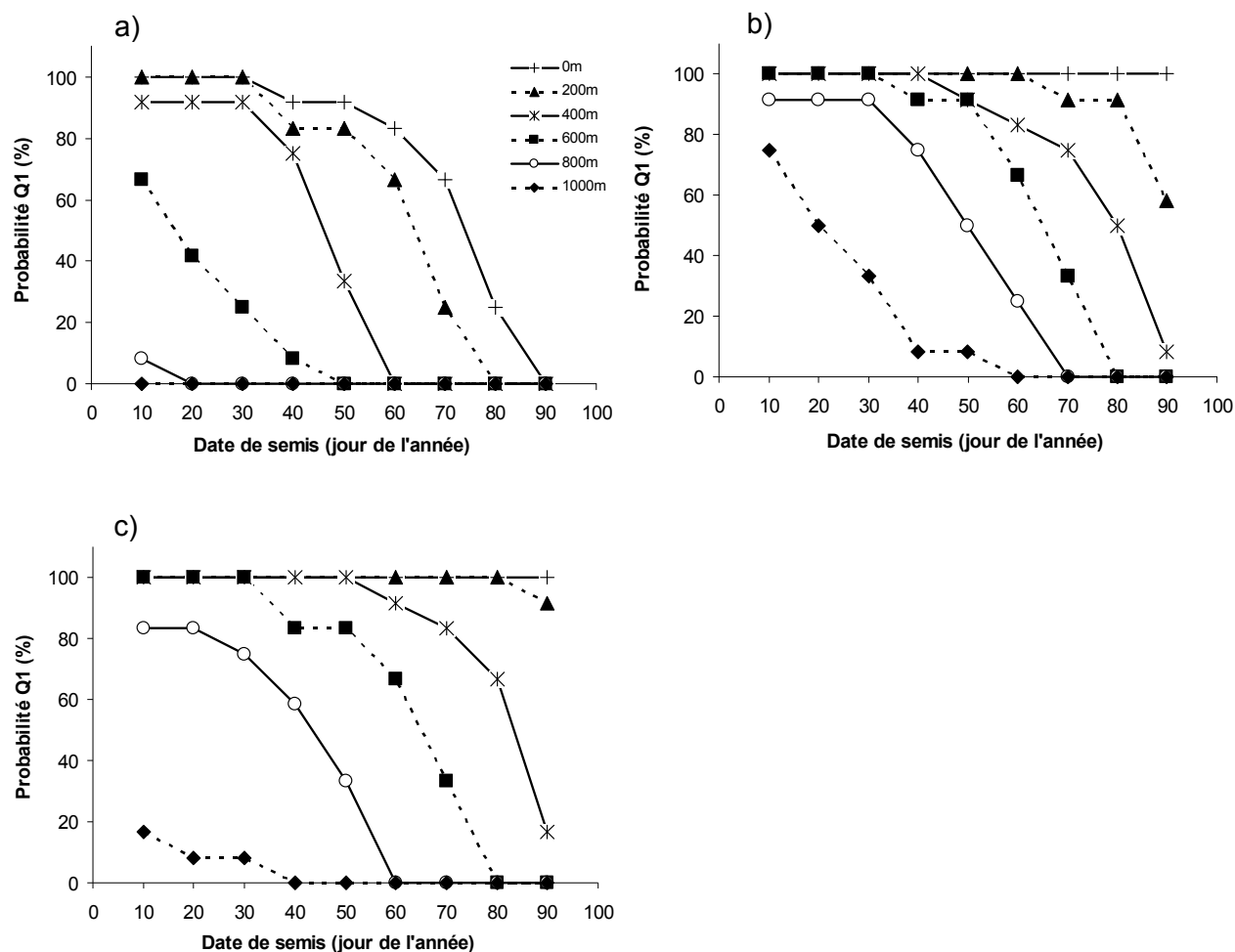


Figure 5: Probabilité Q1 d'atteindre la maturité avant le 5 juillet à Van Chan en fonction de la date de semis et de l'altitude, simulées avec WaTRYSim. a) Riz aérobie. b) Soja. c) Maïs.

3.4.2. Probabilité d'obtenir un rendement élevé sous contrainte hydrique

En raison de la température, du rayonnement et de la pluie plus élevés aux dates tardives (Quyen Luu Ngoc et al., soumis ; figure 2, chapitre 1), le rendement en grains des cultures est plus élevé à la date de semis la plus tardive. La figure 6 présente des exemples pour la probabilité Q2 d'atteindre un rendement excédant 0.7 fois du maximum.

Pour une localité et une culture donnée, la probabilité Q2 augmente avec l'altitude quelle que soit la date de semis (Mulugeta Seyoum et al., 2011). Dans le chapitre 2, nous avons vu que le rendement permis en absence de stress hydrique diminuait lorsque l'altitude augmentait, en raison notamment de l'augmentation de la fréquence des températures basses détruisant la culture dans sa phase juvénile. En conditions pluviales, la faiblesse des précipitations en début de cycle a pour conséquence, dans les simulations, un allongement du temps de germination et de levée qui réduit l'exposition de la culture aux températures

létales pendant sa phase juvénile. Par exemple, la probabilité de mortalité due au froid pour une culture semée entre le 10^e et le 20^e jour à 800 m d'altitude à Van Chan était estimée par simulation à entre 33 % et 44 % pour le riz aérobie, le soja et le maïs dans les conditions non limitantes en eau. Dans les conditions pluviales, cette probabilité était de 11 % pour le riz aérobie, le soja et de 22 % pour le maïs.

Dans les conditions pluviales, la probabilité Q2 dans le cas du sol sans compactage (S1) augmente plus que pour le sol avec plancher imperméable (S2) pour la même situation culturale, parce que le plancher limite la croissance des racines et donc réduit le rendement en grains (Coelho et al., 2000; Calonego and Rosolem, 2010; Chen and Weil, 2011).

Par ordre décroissant de probabilité Q2 pour un semis précoce (avant le 60^e jour) dans une localité donnée, une altitude donnée, les cultures se classent comme suit : soja, maïs et riz aérobie.

Comme le suggère la figure 6, il faudrait semer dans un sol sans compactage après le 30^e jour pour le riz aérobie à moins de 200 m d'altitude à Mu Cang Chai, après le 70^e jour pour le soja à Van Chan, et après le 50^e jour pour le maïs à Phu Ho. Par ailleurs, nous remarquons que le rendement sur sol sans compactage est toujours plus élevé que sur sol avec plancher imperméable, quelles que soient l'altitude et la date de semis.

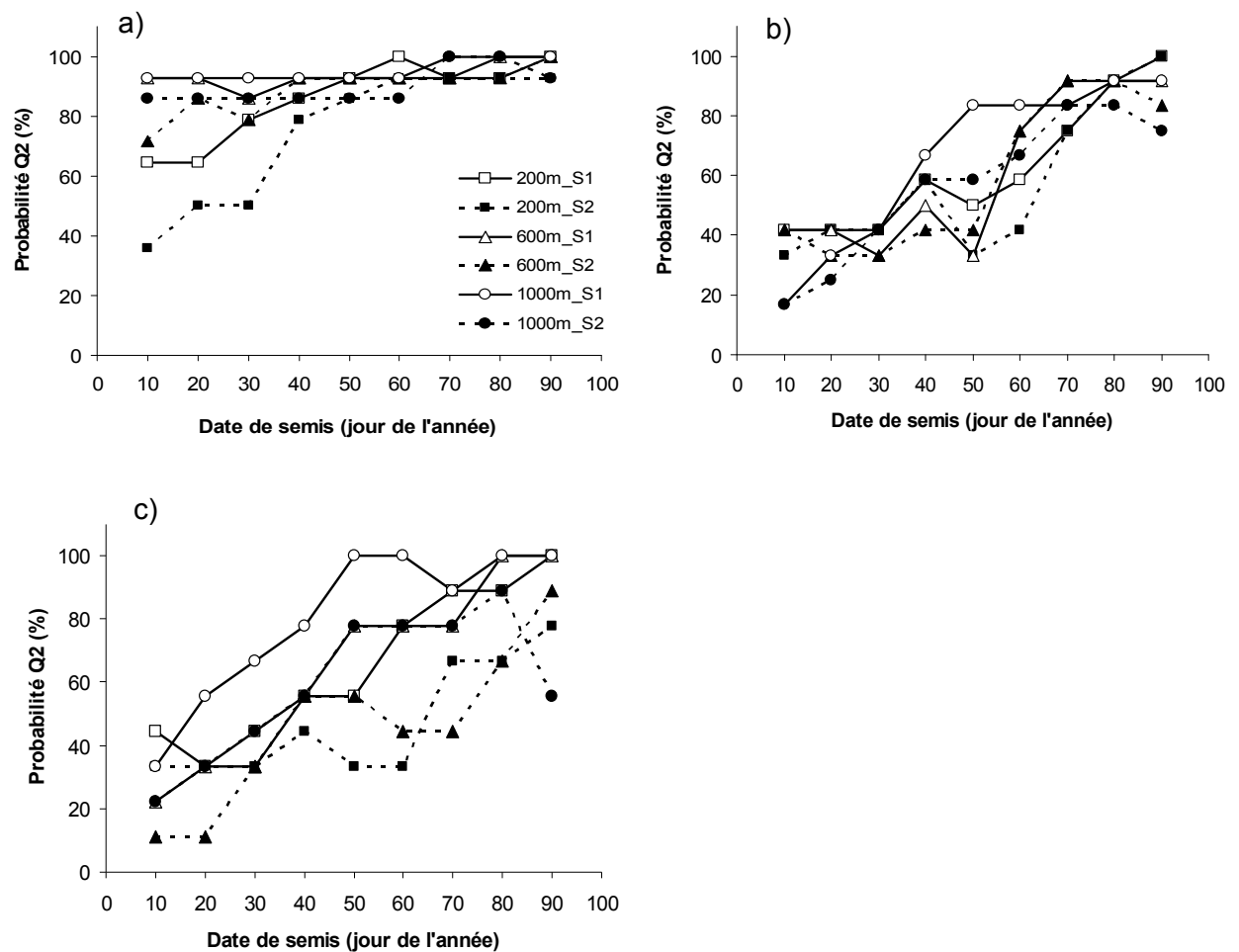


Figure 6: Probabilité Q2 d'obtenir un rendement simulé excédant 0.7 fois le rendement maximal simulé. a) Riz aérobie à Mu Cang Chai, b) Soja à Van Chan, c) Maïs à Phu Ho. S1 : type de sol sans plancher limitant la descente des racines ; S2 : type de sol avec plancher imperméable à 40 cm de profondeur limitant la descente des racines.

3.4.3. Durée de la période de semis pour réussir une culture de printemps

Les résultats qui précèdent confirment que plus la date de semis est tardive, à partir de la première date de semis considérée dans notre expérimentation virtuelle (le 10 janvier), plus Q1 diminue et Q2 augmente.

Nous avons défini une fenêtre de dates de semis favorables à la culture de printemps comme l'intervalle des dates de semis pour lesquelles les probabilités Q1 et Q2 sont supérieures à 80 %. La durée de cette période est un indicateur de la façon dont les conditions de température et de pluviométrie contraignent la faisabilité d'une culture pluviale de printemps avant le cycle de riz irrigué. En effet, plus cette période est large, plus les

agriculteurs disposent de temps pour installer la culture de printemps avec de faibles risques d'échouer. La figure 7 présente la durée de cette fenêtre favorable pour les trois régions climatiques étudiées, en fonction de l'altitude et de l'espèce cultivée. Dans les trois climats étudiés, la présence d'un plancher de rizière faisant obstacle à la descente aux racines réduits très fortement la fenêtre favorable à l'installation d'une culture pluviale au printemps. Le soja ne dispose d'aucune fenêtre favorable pour les critères utilisés, quel que soit le climat considéré. Le climat de la région de Phu Ho est très défavorable aux cultures de printemps en régime pluvial, et seuls y sont praticables, à condition de ne pas être placés en rizière avec obstacle à la croissance des racines, le riz aérobie à très basse altitude et le maïs aux altitudes voisines de 200 m (mais dans ce dernier cas avec une fenêtre très étroite d'une dizaine de jours). Le climat le plus favorable (à altitude de référence identique) est celui de Mu Cang Chai, comme dans le chapitre 2 où l'on ne tenait pas compte d'éventuelles contraintes de stress hydrique. C'est la culture de riz aérobie pour laquelle, selon les critères utilisés dans cette étude, la durée de la période favorable est la plus longue.

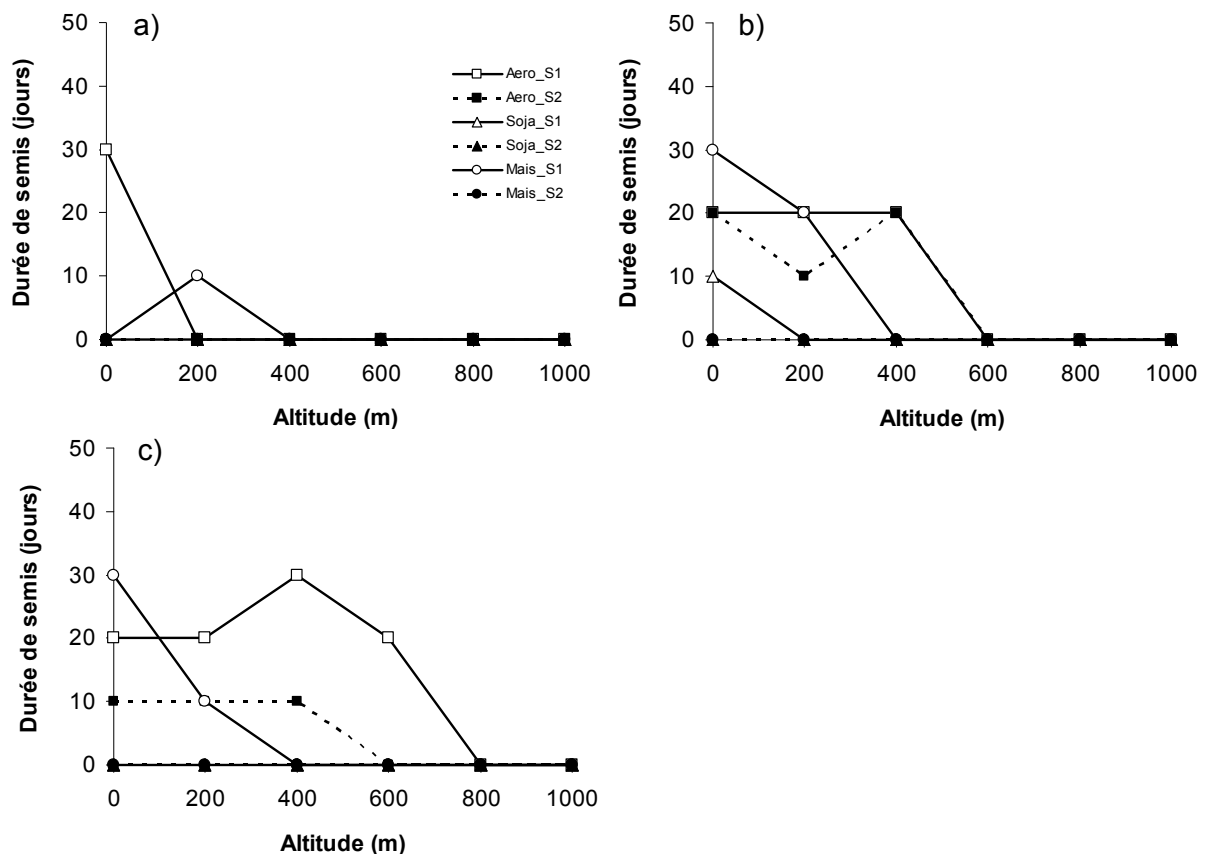


Figure 7: Durée de la période favorable (probabilités Q1 et Q2 simultanément supérieures à 80 %) pour semer les cultures étudiées. a) Phu Ho, b) Van Chan, c) Mu Cang Chai.

4. Discussion

4.1. Modélisation du bilan hydrique

Le calage du module de bilan hydrique de WaTRYSim a conduit à retenir une valeur de 0.45 pour le paramètre Pfactor ce qui est en accord avec l'intervalle des valeurs de référence de la FAO qui est de 0.35 à 0.50 pour une légumineuse et de 0.50 à 0.55 pour une céréale (Allen et al., 1998).

4.2. Modélisation de la germination et de la levée

Les paramètres aGer et bGer de notre module calculant l'influence de l'état hydrique du sol sur la levée, ont été calés à 14 % et 10 %. Cela signifie que lorsque le taux de remplissage de la réserve utile du sol dans la couche supérieure devient inférieur à 9%, la levée est stoppée et qu'elle reprend lorsque ce taux de remplissage devient supérieur à 14%. Ces valeurs aGer et bGer sont équivalentes à celles obtenues par Helms et al. (1996) pour la levée du soja. Ces auteurs ont trouvé qu'au-dessous de 9 %, la levée est réduite, alors qu'elle est satisfaisante pour une teneur en eau du sol supérieure à 15 %. Tyagi and Tripathi (1983) ont également montré que l'humidité optimale du sol pour la germination et l'émergence du soja était de 10-15 % dans un sol sablo-limoneux.

Nos estimations des constantes thermiques de germination – levée confirment celles d'autres auteurs. Pour le soja, nous avons obtenu une température de base pour la période semis-levée, Tger, de 7 °C et une constante thermique CTL de 85 °C jour, similaires à la valeur Tger = 7.5 °C de Norsworthy and Oliveira (2007), et également similaires à celles de Qi et al. (1999) pour une levée de légumineuses de 50 % : Tger 8.5 - 9.3 °C et CTL de 56 – 121 °C jour. Pour le maïs en zone semi-aride de l'Est du Kenya, Itabari et al. (1993) ont trouvé Tger de 6.1 °C et CTL pour une levée à 50 % de 51.5 - 56.4 °Cjour, c'est un même résultat que nous avons trouvé avec Tger de 6 °C et un CTL de 90 °C jour. Pour le riz aérobie, nous avons trouvé un Tger de 8 °C avec 115 °C jour, similaires à la valeur Tger = 9.8 - 10.9 °C et le CTL de 69 – 73 °C jour en condition semi-aride de Gombos and Simon-Kiss (2008).

La levée est dans la réalité influencée directement par la température du sol et non par celle de l'air, mais la relation existant entre ces températures est telle que la simplification que nous avons utilisée est efficace, comme l'ont aussi montré d'autres auteurs (Sharma et al., 2010). Nous avons considéré une levée en « tout ou rien », et non pas une densité de peuplement après levée qui dépendrait de la mortalité d'une certaine proportion de plantules (Rahmianna et al., 2000), et il est possible que cela ait conduit à sous estimer quelque peu les effets des stress hydriques sur les rendements finaux.

4.3. Modélisation du LAI, de la biomasse et du rendement

Nous avons trouvé que si le stock hydrique utile de la zone racinaire était inférieur à 55 % de la teneur en eau totale (seuilTurg = 0.45), la croissance de la culture et le LAI diminueraient, et si ce seuil était inférieur à 65 % (seuilWS = 0.35), alors ce sont la biomasse et le rendement qui diminueraient. Ces résultats confirment ceux de la littérature. Pour une culture de maïs, Ge et al. (2011) montrent que lorsque l'eau utile efficace (WUE) est inférieure à 55 % de la capacité au champ, alors que la hauteur, le LAI, le diamètre de la tige et l'accumulation de biomasse diminuent. Des résultats équivalents sont obtenus pour le soja par Fernandez et al. (2011).

La sensibilité de chaque culture au stress hydrique est différente, et elle n'est pas non plus la même pour tous les stades phénologiques d'une culture (Ge et al., 2011). Cela peut expliquer les différences de performances constatées entre espèces pour WaTRYSim, dans la mesure où nous avons utilisé un paramétrage unique pour toutes les cultures. Un calage par culture aurait été possible, mais aurait considérablement allongé le travail pour un gain de précision pas nécessairement considérable. WaTRYSim a le mieux simulé le LAI, la biomasse et le rendement du riz aérobie avec des erreurs inférieures à 20 %, mais les simulations étaient moins performantes pour le LAI du maïs, avec 31 % d'erreur relative, et la biomasse du soja, avec 21.2 %. WaTRYSim a simulé de manière très satisfaisante le rendement pour les trois cultures, avec des erreurs d'estimation inférieures à 17.6 %, soit 0.27 t/ha de riz aérobie, 0.18 t/ha pour le soja et 0.62 t/ha pour le maïs. En comparaison avec d'autres études, les erreurs d'estimation de WaTRYSim sont néanmoins tout à fait acceptables : Jego et al. (2011) en travaillant avec STICS, ont obtenu des erreurs relatives proches ou inférieures à 30 % de prédiction du LAI et de la biomasse, et inférieures à 20 % pour le rendement, et ces auteurs montrent que cela reste correct pour obtenir de bonnes prédictions du LAI, de la biomasse et du rendement pour une zone géographique donnée. Irmak et al. (2005), utilisant le modèle CROPGRO-soja pour l'évaluation des effets des changements climatiques sur les rendements de soja, ont obtenu une RRMSE comprise entre 23 et 29 % pour le rendement.

4.4. Poids relatif de la contrainte hydrique et des autres contraintes climatiques pour la faisabilité d'une culture pluviale au printemps

Les figures 8 et 9 présentent pour des exemples de combinaisons de région climatiques et de cultures, respectivement les probabilités Q1 et Q2, telles que définies au présent chapitre, et les probabilités correspondantes pour le cas où l'eau n'est pas limitante, respectivement P1 et P3, calculées au chapitre précédent.

On constate que la probabilité Q1 est inférieure à la probabilité P1. Autrement dit, la prise en compte du stress hydrique dans les simulations, du fait de son influence sur la durée

entre semis et levée, se traduit par une diminution de la probabilité d'atteindre la maturité avant la date butoir du 5 juillet (figure 8).

Le stress hydrique réduit aussi très fortement la probabilité d'atteindre un rendement simulé proche du rendement maximal simulé pour la combinaison de facteurs considérée. En condition hydrique potentielle, pour réussir une culture avec un rendement en grain supérieur à 0.7 fois le maximum avec une probabilité de succès supérieur à 0.8, à 600 m d'altitude, on peut semer à partir du 10^e jour pour le riz aérobie à Mu Cang Chai, et du 20^e jour pour le soja à Van Chan, et le maïs à Phu Ho. Mais sous stress hydrique, il faut les semer respectivement après le 20^e, 60^e et 80^e jour (figure 9). Dans le cas du soja et du maïs, c'est surtout la réduction du rendement par le stress hydrique qui contribue à réduire la durée de la fenêtre favorable au semis par rapport au cas où l'eau n'est pas limitante.

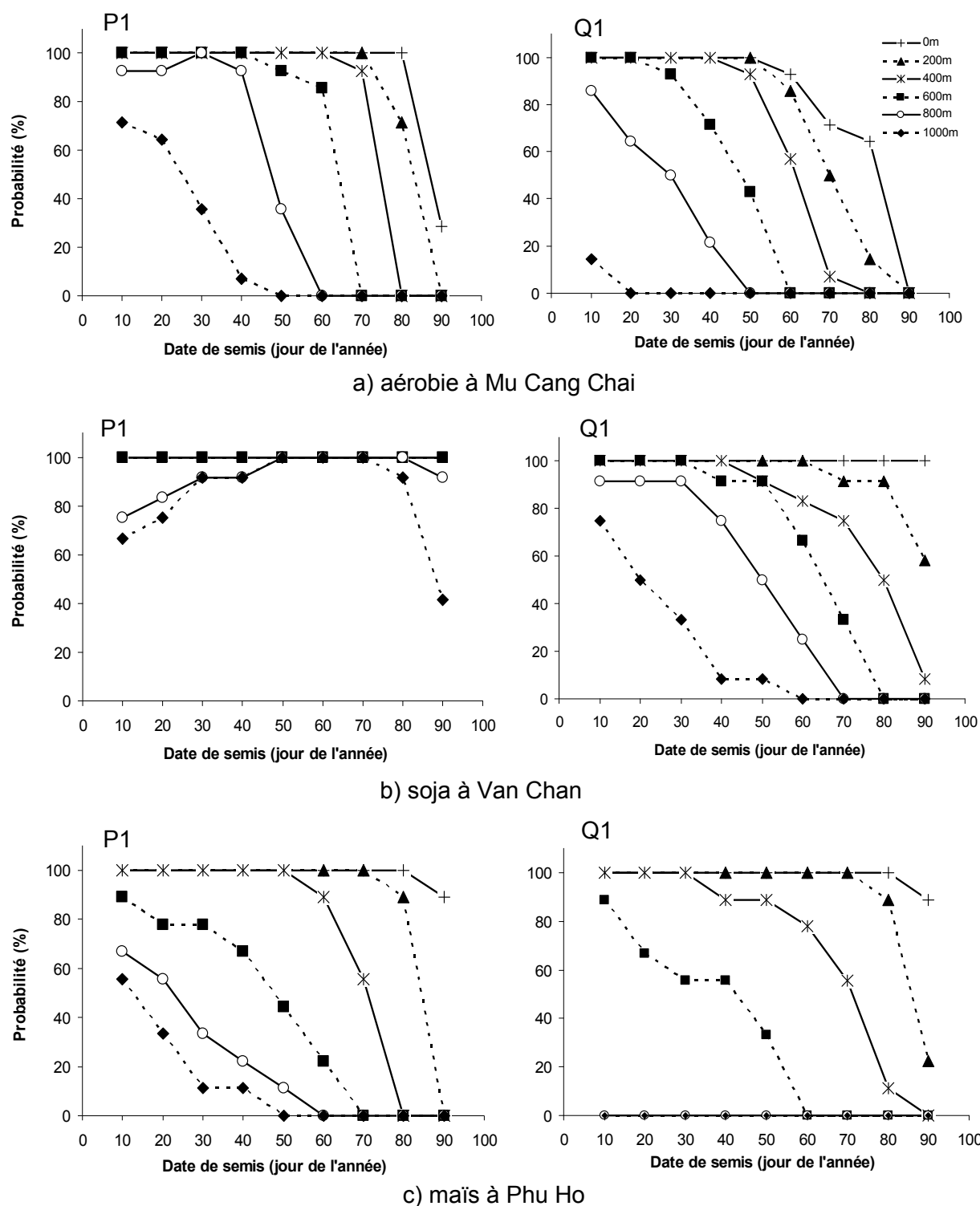


Figure 8: Comparaison des probabilités d'atteindre la maturité de la culture avant le 5 juillet selon que l'on considère que l'eau n'est pas (colonne de gauche, probabilité P1, voir chapitre précédent) ou est (colonne de droite, probabilité Q1) limitante pour trois exemples de combinaisons de régions climatiques et de cultures a) riz aérobie à Mu Cang Chai, b) soja à Van Chan, c) maïs à Phu Ho.

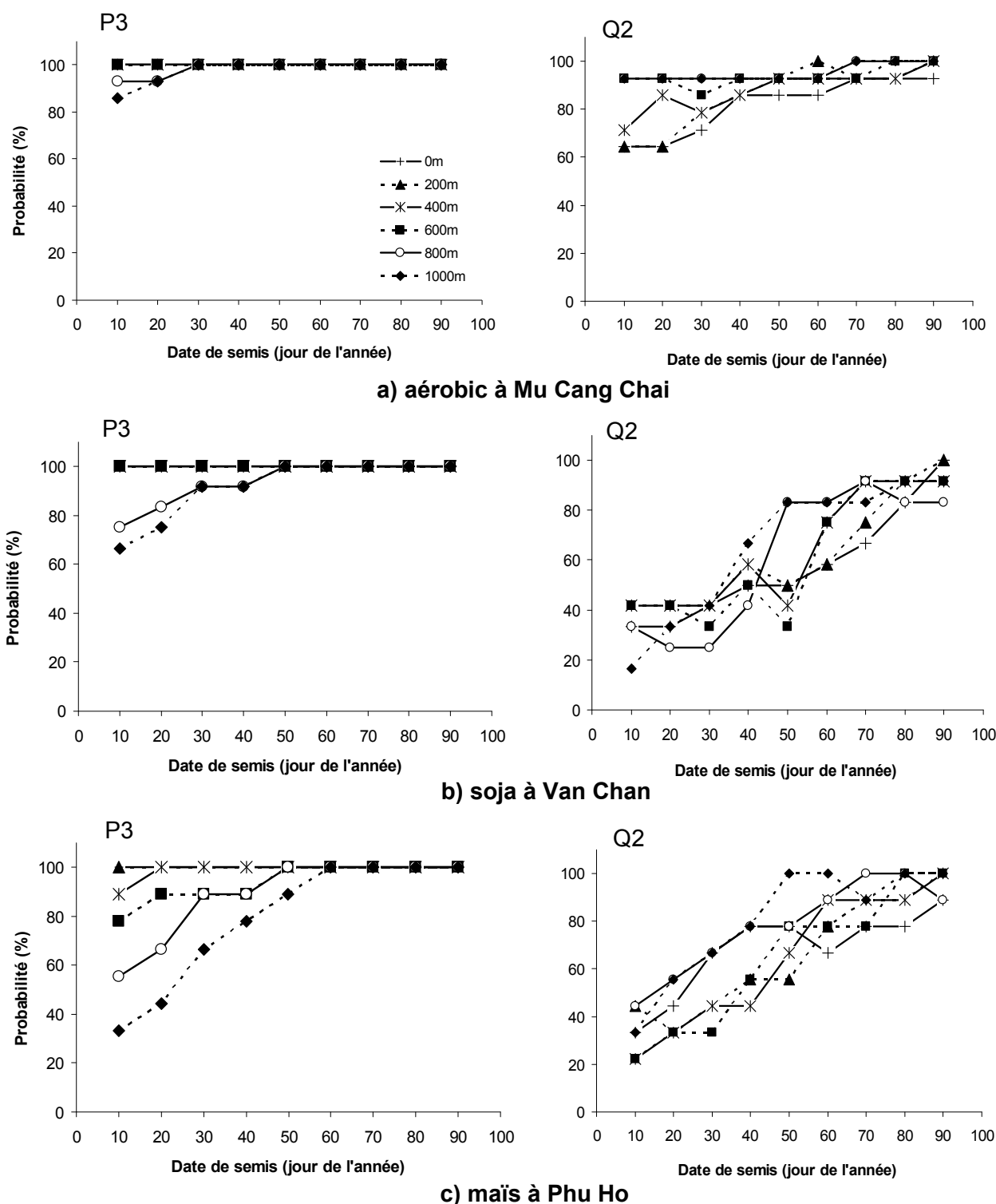


Figure 9 : Comparaison des probabilités d'obtenir un rendement simulé supérieur à 0.7 fois le rendement maximum, dans le cas d'un sol sans obstacle à la descente en profondeur des racines, selon que l'on considère que l'eau n'est pas (colonne de gauche, probabilité P3, voir chapitre précédent) ou est (colonne de droite, probabilité Q2) limitante pour trois exemples de combinaisons de régions climatiques et de cultures a) riz aérobie à Mu Cang Chai, b) soja à Van Chan, c) maïs à Phu Ho.

Par rapport au cas étudié dans le chapitre 2, c'est-à-dire par rapport aux situations en absence de stress hydrique, la durée de la période de semis favorable est considérablement réduite lorsqu'on prend en compte les risques de stress hydriques réduisant les rendements et retardant la date de levée et ainsi de maturité (figure 10). C'est tout particulièrement vrai lorsque l'on considère un sol comportant un obstacle à la croissance des racines. Par exemple, dans les conditions hydriques non limitantes, la fenêtre favorable de semis a été estimée supérieure à 50 jours pour un maïs et 30 jours pour un riz aérobie à Van Chan et Mu Cang Chai pour des altitudes inférieures à 800 m. Avec la contrainte hydrique, en sol 1 (pas de plancher), cette durée se réduit à 30 jours pour un maïs et 20 jours pour un riz aérobie dans ces localités. A Phu Ho à moins de 200 m d'altitude, en sol sans compactage (sol 1), la durée de semis est supérieure à 40 jours pour riz aérobie et 70 jours pour le maïs dans condition sans stress hydrique, mais elle se réduit à 10 et 30 jours avec la contrainte hydrique. Pour le soja, le stress hydrique a fortement réduit la durée de la période favorable pour le semis. Aux altitudes inférieures à 600 m, cette durée était estimée à plus de 50 jours dans les conditions irriguées, quelle que soit la région climatique considérée parmi les trois régions de notre étude. En conditions pluviales, il n'existe pas de date de semis favorable pour cette culture selon les critères Q1 et Q2 quelles que soient la région climatique et l'altitude, sauf pour la région de Phu Ho aux altitudes les plus basses de l'intervalle testé. Cependant, une seule date est favorable selon les critères retenus (durée de la période favorable limitée à 10 jours).

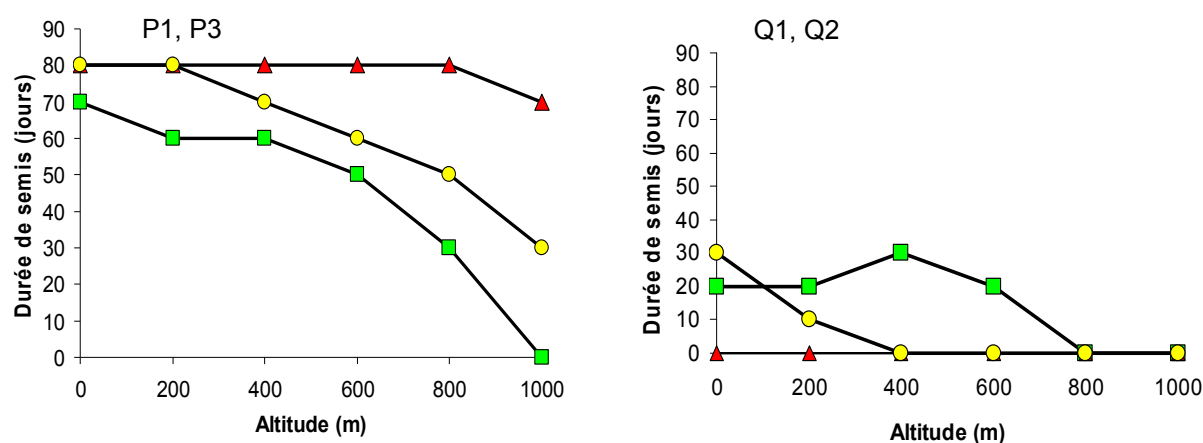
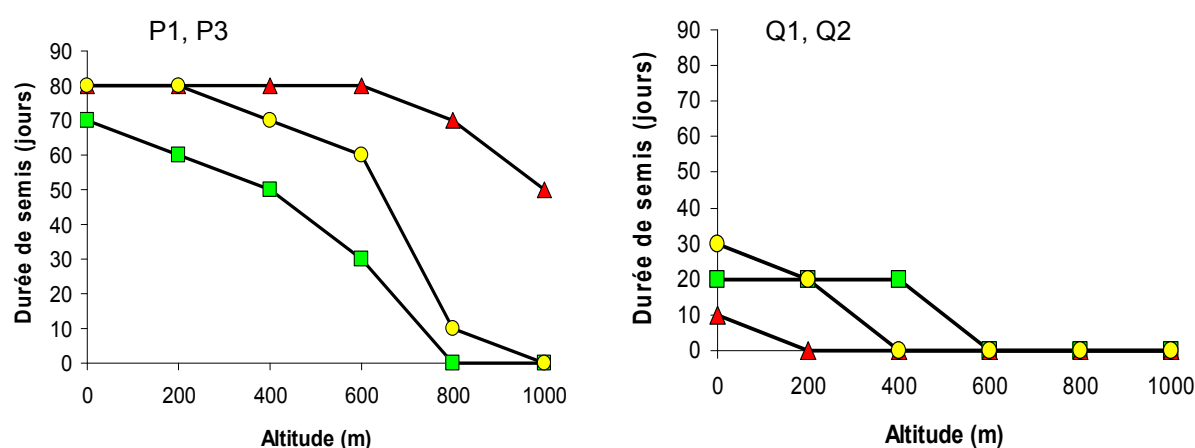
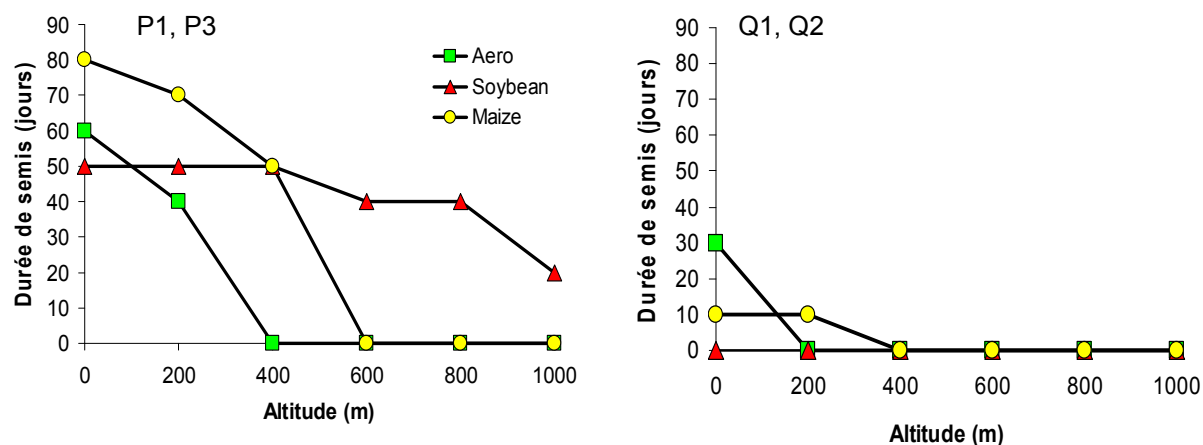


Figure 10 : Comparaison de la durée de la période de semis favorable selon que l'on considère que l'eau n'est pas (résultats du chapitre 2, colonne de gauche) ou est (résultats du chapitre 3, colonne de droite) limitante pour des combinaisons d'altitude et de cultures à : a) Phu Ho, b) Van Chan, c) Mu Cang Chai.

5. Conclusion

Dans la première version du modèle WaTRYSim, nous avons simulé les influences de la température et du rayonnement sur la culture pluviale de printemps au Nord du Vietnam. Dans le chapitre 3, cette version a été complétée par la prise en compte du facteur hydrique (les précipitations). Ce facteur s'est révélé être une contrainte majeure de la culture de printemps, réduisant fortement les possibilités de culture par rapport au cas où l'irrigation est praticable au printemps. Cette contrainte est aussi très variable selon le climat régional et l'altitude en relation avec l'interaction entre la durée du cycle sous dépendance de la température, et la position des stress hydriques par rapport aux variations de sensibilité de la culture à ces stress au cours de son cycle.

Notre méthode utilise un modèle simple, calé sur des situations expérimentales contrastées du point de vue du facteur hydrique, et définit des indicateurs de la contrainte hydrique pour la culture de printemps conduite en conditions pluviales. Elle donne la possibilité de repérer de manière adéquate les intervalles de dates de semis pour lesquelles les risques de mauvaises performances de cette culture sont faibles, en fonction de la région climatique, de l'altitude des parcelles dans ces régions, de la culture considérée, et de la présence ou non d'obstacles à la croissance en profondeur des racines. Ce type d'information nous semble pouvoir contribuer à orienter la politique de soutien au développement des cultures de printemps en tenant compte de la diversité des situations agricoles des montagnes du Vietnam ou d'environnements comparables. Toutefois, WaTRYSim n'a pas pris en compte certaines techniques culturales qui pourraient réduire les contraintes de température ou d'humidité, comme le semis sous mulch pailleux qui pourrait limiter l'évaporation du sol (Scopel et al., 2004; Affholder et al., 2006). Nous n'avons pas non plus considéré jusqu'ici certains problèmes agronomiques qui se posent avec l'introduction d'une culture de printemps et qui peuvent interagir avec les contraintes climatiques que nous avons traitées. La discussion de ces limites à notre analyse agroclimatique fera l'objet du chapitre 4.

Chapitre 4 : Marges de manœuvre technique pour réduire les contraintes climatiques

Diverses techniques agronomiques sont envisageables pour réduire l'impact sur les cultures des basses températures et/ou de la faible pluviométrie au printemps, et donc pour augmenter la taille des « fenêtres de semis » estimées dans les chapitres précédents. Ce chapitre a pour but d'identifier ces techniques et de les hiérarchiser en fonction de leur efficacité. Une analyse de sensibilité du modèle est d'abord présentée, contribuant à mieux cerner les sources d'erreurs dans les analyses des chapitres précédents et à identifier les variables clefs des systèmes de culture sur lesquelles ces techniques devront agir. Les principales techniques envisagées sont ensuite évaluées par expérimentations virtuelles à l'aide du modèle et discutées

1. Analyse de sensibilité du modèle

Une analyse de sensibilité du modèle à ses principaux paramètres a été réalisée, selon la technique « un à la fois », c'est-à-dire sans aborder les interactions entre paramètres. Certains paramètres sont repérables à priori comme agissant de manière conjointe : ceux qui apparaissent dans des produits dans les équations du modèle. Dans ce cas de figure, a été traité uniquement le paramètre ayant le poids le plus important, analytiquement, dans l'équation. Par exemple, la sensibilité du modèle à l'efficacité de conversion du rayonnement intercepté a été testée, mais pas l'influence du coefficient d'extinction. Les variations des résultats de simulation en fonction de variations du coefficient de conversion seront à interpréter comme la sensibilité du modèle à l'efficacité de conversion du rayonnement incident (et non intercepté). La variable sur laquelle portait l'analyse de sensibilité était la taille en jours de la fenêtre favorable au semis, telle que définie dans les chapitres précédents. L'analyse a été appliquée pour deux cas de figure agronomiques : d'une part la culture de riz irrigué, qui a été repérée au chapitre 2 comme la culture la plus sensible aux contraintes climatiques en conditions irriguées, et d'autre part le soja en condition pluviales, qui a été repérée au chapitre 3 comme la culture la plus sensible aux contraintes climatiques en conditions pluviales.

Dans le cas du riz irrigué, un seul climat a été considéré, celui de la station de Phu Ho, repéré comme le plus contraignant car le plus froid. L'altitude de 400m a été choisie, comme représentative de la plupart des rizières irrigables au printemps.

Dans le cas du soja en conditions hydriques limitantes, l'analyse a été répétée pour les trois stations, car les fenêtres de semis favorables y étaient toutes très étroites de telle sorte qu'il était difficile d'en distinguer une nettement plus contraignantes que les autres. Les analyses

ont été réalisées pour une altitude arbitrairement fixée à 0m, de manière à placer l'analyse dans le contexte où la température est la moins contraignante, pour la station choisie, et ainsi mieux cerner le rôle spécifique de l'interaction entre la culture modélisée et la distribution des précipitations. Pour chaque paramètre retenu pour l'analyse, on a appliqué des variations de + 20% à -20% par rapport aux valeurs obtenues par calage (pour les paramètres de calage) ou correspondant aux valeurs retenues pour les expérimentations virtuelles des chapitres 2 et 3 pour ceux des paramètres décrivant les situations culturales testées.

Les paramètres retenus pour l'analyse de sensibilité dans le cas du riz irrigué sont la durée totale du cycle de la culture en temps thermique (notée CT dans ce qui suit, les variations testées étant répercutées sur les constantes thermiques de chaque stade phénologique en proportion de la part de chacune sur la durée totale). La température base de calcul du temps thermique T_{min} , la température seuil de mortalité de la culture aux basses températures (T_{cold}), l'efficacité de conversion maximale (eb_{max}), la croissance potentielle du LAI par unité de temps thermique ($dLAI$), et deux paramètres clefs de la répartition vers les grains de la biomasse accumulée, C_{grain} et IR_{max} . Dans le cas du soja en conditions hydriques limitantes, s'ajoutent à ces paramètres la densité apparente du sol (da) déterminant la réserve utile, le paramètre de sensibilité de la culture à la sécheresse du sol après levée, P_{factor} , le paramètre de sensibilité de la culture à la sécheresse du sol pendant la levée, b_{ger} , le seuil de remplissage de la réserve hydrique du sol à partir duquel l'évaporation du sol est réduite par rapport à la demande évaporative ($SeuilEvap$) et le paramètre de vitesse de croissance racinaire ΔRac_{Max} .

Dans le cas du riz irrigué, la taille simulée de la fenêtre de semis favorables est sensible uniquement aux paramètres de durée de cycle, de température base de calcul du temps thermique et de température seuil de mortalité (Figure 1). Ce résultat était attendu dans la mesure où l'on a établi au chapitre 2 que la taille de la fenêtre de semis favorable n'était pas influencée par la probabilité P_3 d'obtenir un rendement inférieur à 70% du rendement maximal. Dans le détail, on note qu'un abaissement de 10 ou 20% de T_{cold} ne conduit pas à une augmentation de la taille de la fenêtre favorable au semis, car les périodes froides du printemps au Vietnam comportent en général des températures nettement inférieures (de plus de 20%) à la valeur de T_{cold} de la variété testée dans cette thèse. On retrouve ce résultat pour le soja (Figure 2) dont la température base est inférieure de 1°C à celle du riz (cf table 1, chapitre 2). On peut en déduire que ce résultat s'applique également au maïs et au riz aérobie dont les valeurs de T_{cold} sont identiques à celles du soja et du riz irrigué, respectivement.

Un abaissement de la température base de calcul du temps thermique de 20% conduit à une augmentation de 20 jours de la fenêtre de semis soit 50% dans le cas étudié. Une

augmentation de même ampleur est obtenue avec une diminution de 10% de la constante thermique totale du cycle, mais une diminution supplémentaire de cette constante ne produit plus d'effet sur la taille de la fenêtre, probablement à cause d'un nombre important de journées où la température est inférieure à la température base. On peut en déduire que pour aller au-delà d'une augmentation de 50% de la durée de la taille de la fenêtre par sélection variétale, il sera nécessaire de combiner réduction de température base et réduction de la constante thermique totale.

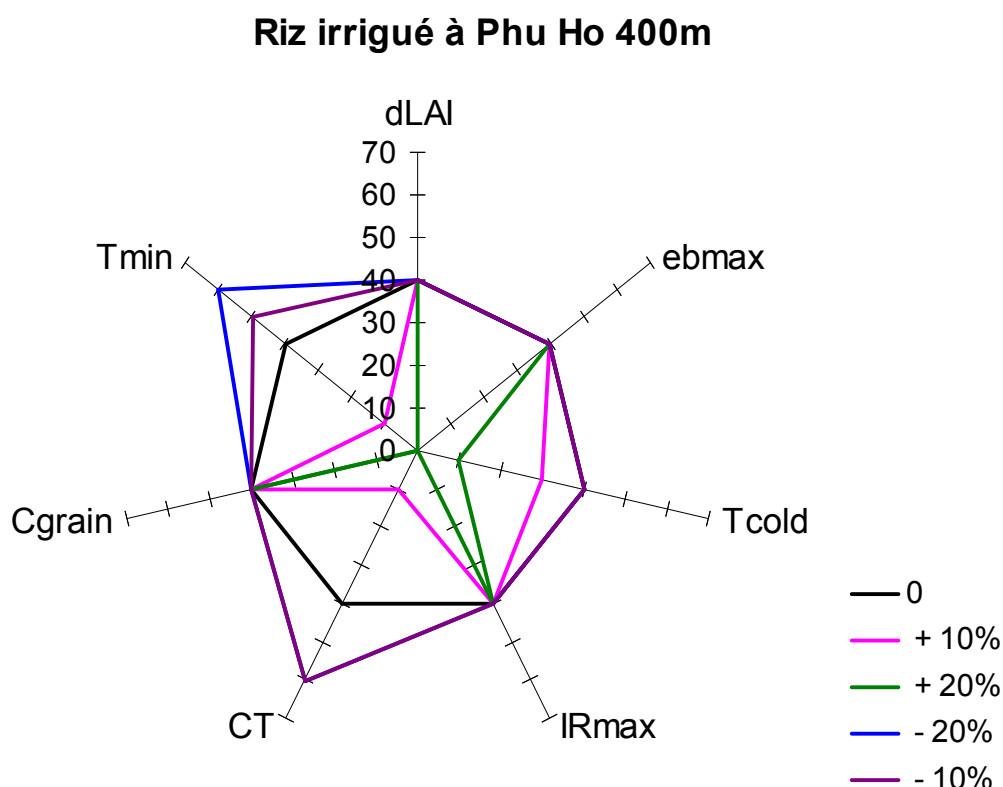


Figure 1. Sensibilité de la fenêtre de semis favorable du riz irrigué à Phu Ho 400m d'altitude à des variations de paramètres du modèle de -20% à +20% autour de leurs valeurs nominales.

Dans le cas de la culture de soja non irrigué (Figure 2), on retrouve une influence importante des paramètres de la durée du cycle, ce qui était également attendu dans la mesure où plus la culture est courte plus elle peut être placée vers la partie tardive du printemps, plus pluvieuse, sans risquer d'obtenir une maturité tardive compromettant le cycle d'été. Les rôles relatifs de la température base et de la constante thermique totale varient selon les climats étudiés, mais pour les trois stations l'impact sur la taille de la fenêtre de semis d'une réduction de leurs valeur est plus important que pour le riz irrigué. Ceci provient du fait que le

risque hydrique détermine des fenêtres de semis plus étroites qu'en conditions irriguées, et qu'à l'extrémité précoce de cette fenêtre les températures sont plus élevées qu'à l'extrémité précoce de la fenêtre de semis des cultures irriguées. Les paramètres d'arrêt de la levée en condition de sécheresse de la région superficielle du sol sont sans influence sur la simulation de la fenêtre de dates de semis favorables. Ceci indique que d'éventuelles imprécisions de ces paramètres sont sans conséquences sur la robustesse du modèle et de l'analyse qu'il permet de conduire. Mais cela n'indique pas pour autant que les conditions de levée ne jouent pas un rôle important dans la taille des fenêtres de semis. En effet, les seuils de teneurs en eau autorisant la levée n'interviennent pas dans le calcul quand le sol superficiel est au point de flétrissement permanent, ce qui est souvent le cas en début de saison et rend effectivement impossible la levée dans la réalité comme dans le modèle. La levée est donc avant tout déterminée, dans les simulations comme dans la réalité, par la date –souvent très tardive- à laquelle interviennent les premières pluies humectant l'horizon superficiel du sol. Le modèle est relativement sensible à la réserve utile du sol (sensibilité aux variations de D_a). Dans le contexte de Phu Ho et Van Chan, où il est également sensible aux variations du paramètre E_{bmax} , ceci est dû au fait que sous ces climats, pour une variation donnée de E_{bmax} , le rendement maximal (obtenu l'année la plus favorable du point de vue hydrique) varie davantage que le rendement obtenu les années où le stress hydrique est important. En conséquence, la probabilité d'avoir un rendement inférieur à 70 % du rendement maximal diminue lorsque e_{bmax} diminue. Ceci se traduit par une augmentation de la taille des fenêtres de semis favorables dans les climats de Phu Ho et Van Chan, mais pas à Mu Cang Chai où seule la durée du cycle influence la taille de la fenêtre favorable, pour les gammes testées de variations des paramètres.

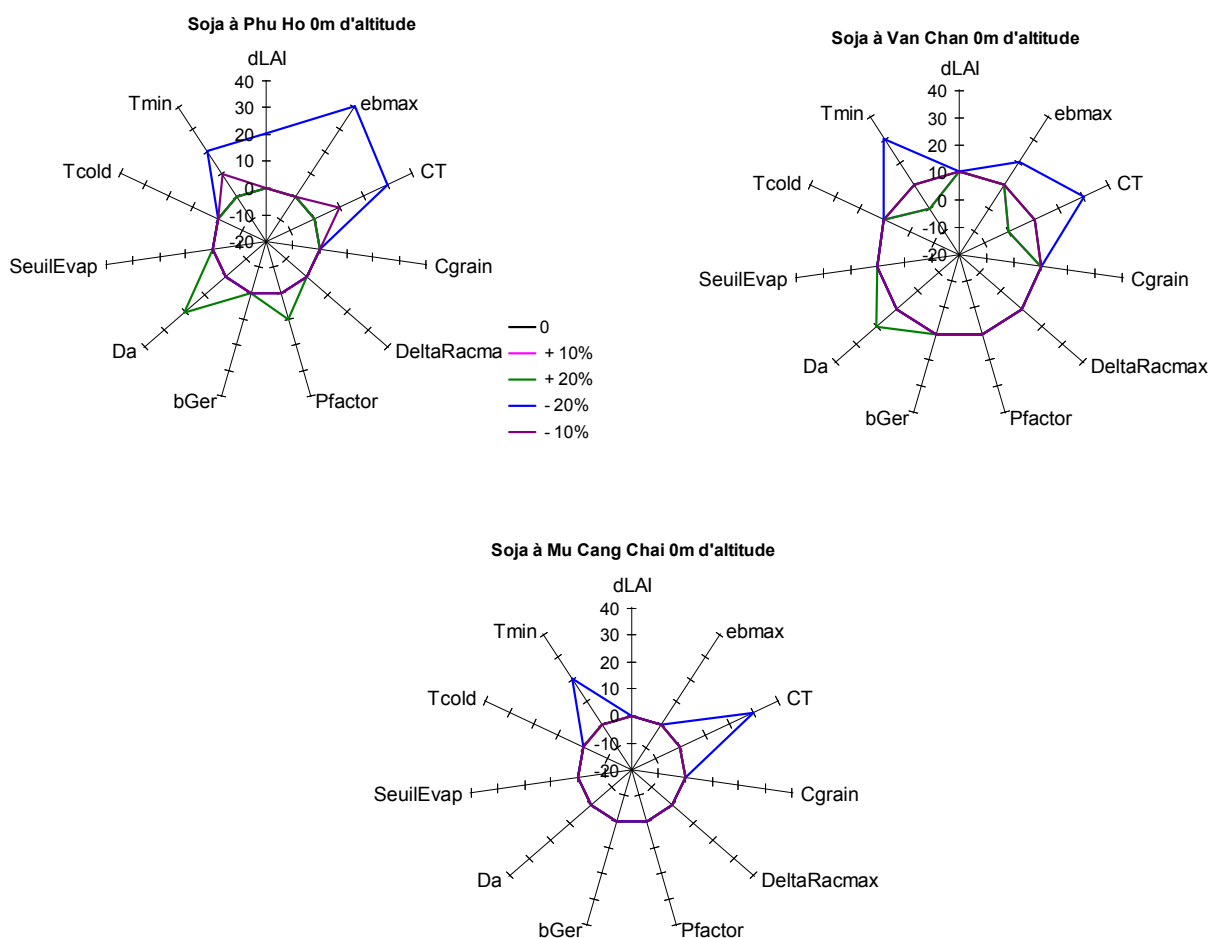


Figure 2. Sensibilité de la taille en jours fenêtre de semis favorable du soja à 0m d'altitude à des variations de paramètres du modèle de -20% à +20% autour de leurs valeurs nominales.

Cette analyse de sensibilité nous renseigne ainsi à la fois sur la robustesse du modèle et sur les techniques envisageables pour augmenter les possibilités de réussir les cultures de printemps. La robustesse du modèle pour la question traitée dans cette thèse dépend avant tout de la qualité de la simulation des durées de cycle. Dans la mesure où il s'agit justement de l'aspect pour lequel le modèle a été calé avec le plus de précision, comme on l'a vu au chapitre 2, on peut accorder une confiance élevée aux simulations en conditions non limitantes en eau. Pour les situations où l'eau est limitante, le modèle est évidemment d'autant plus sensible aux paramètres du bilan hydrique que l'on étudie des situations où la pluviométrie est effectivement contraignante. Mais la sensibilité à Ebmax suggère en fait que l'analyse de l'impact de la contrainte hydrique est très dépendante du seuil que l'on utilise pour qualifier l'écart entre le rendement obtenu sous contrainte hydrique et le rendement maximal obtenu l'année où cette contrainte est la plus faible. Les fenêtres de semis favorables définies dans cette thèse sont, tout particulièrement pour ce cas de figure,

surtout utiles pour comparer les localités et les cultures entre elles, mais ne suffisent en aucun cas à déterminer s'il est pertinent ou pas de tenter une culture en conditions pluviales en un lieu donné et à une date donnée.

Concernant les techniques envisageables, à part celles agissant directement sur la température (serres) ou sur l'offre en eau (irrigation), on ne peut guère identifier à ce stade de l'étude que la mise au point de variétés plus précoces et ou plus tolérantes aux basses températures). Les variations testées du paramètre de la fonction d'évaporation ont été sans effet sur la durée des fenêtres de semis favorables, ce qui suggère qu'une technique de réduction de l'évaporation telle que l'utilisation de mulchs pailleux ou plastique a peu de chance de réduire significativement la contrainte pluviométrique s'exerçant sur les cultures de printemps. Cependant, les variations du paramètre testé ne réduisent qu'assez peu l'évaporation elle-même dans la mesure où elles ne modifient pas l'évaporation pendant les journées qui suivent immédiatement les pluies, où le sol évapore à l'évaporation potentielle. Ces journées sont d'autant plus nombreuses qu'on a affaire à des évaporations potentielles basses au printemps et à des pluies de faible hauteur mais relativement fréquentes. L'analyse de sensibilité ne permet donc pas d'écarter totalement la possibilité que les techniques à base de mulch pailleux ou plastique augmentent de façon utile la taille de la fenêtre de semis. Une modélisation minimale de l'effet de ces mulchs sur l'évaporation paraît donc justifiée pour explorer cette possibilité.

2. Evaluation des principales techniques envisageables

2.1. Sélection variétale

Concernant la contrainte de température, la sélection de variétés à cycle plus court et/ou plus tolérantes aux températures basses que les variétés pour lesquelles notre modèle a été calé permettra d'élargir les fenêtres de semis favorables aux cultures de printemps, comme l'a montré en particulier l'analyse de sensibilité du modèle. Notre travail suggère que c'est surtout la tolérance aux basses températures pendant la phase végétative qui doit être recherchée. En effet, notre expérimentation virtuelle du chapitre 2 indique que les températures basses sont rares au moment de la formation des grains (les basses températures peuvent en théorie réduire fortement le nombre de grains dans le cas des céréales). La baisse de la température seuil en-dessous de laquelle le froid est létal n'est en revanche pas susceptible d'apporter d'avantage notable, pour des réductions de ce paramètre de plus de 20%. Si les sélectionneurs identifient comme raisonnable l'objectif d'aller plus loin par sélection variétale, une étude plus poussée de la sensibilité de notre modèle à ce paramètre pourra identifier plus précisément l'objectif à atteindre. L'analyse de sensibilité indique que le gain de marge de manœuvre attendu d'une sélection qui aboutirait

à constantes thermiques plus faibles peut être substantiel, mais ceci a peu de chance d'être obtenu sans baisse du rendement potentiel. Il semble que ce soit donc avant tout sur la réduction de 1 ou 2 °C de la température base de développement que le gain de marge de manœuvre à attendre de la sélection variétale soit le plus important. Ceci serait cependant à vérifier pour d'autres stations climatiques du Vietnam que celles étudiées ici.

2.2. Irrigation

Concernant la contrainte hydrique, dont on a vu l'importance au chapitre 3, nous avons considéré deux cas extrêmes : le cas où l'eau d'irrigation est abondante et le cas où aucune irrigation n'est praticable. Toute une gamme de situations intermédiaires existe sur le terrain et selon les localités, plus ou moins d'eau est disponible, plus ou moins tôt dans la saison. Le poids de la contrainte hydrique sur la faisabilité de la culture de printemps sera donc très variable dans la réalité entre les deux cas traités. On peut noter cependant que dans la mesure où une part importante de la réduction des « fenêtres de semis » par la contrainte hydrique en conditions pluviales strictes provient des difficultés de levée en sol peu humide, une attention particulière devra être portée à la disponibilité de l'eau d'irrigation en tout début de saison. Une expérimentation virtuelle complémentaire a été conduite pour mieux cerner les stratégies d'irrigation possibles, et notamment identifier dans quelle mesure des irrigations limitées au début de la saison permettent d'accroître nettement la taille de la fenêtre favorable au semis. On a procédé en testant, pour la culture la plus contrainte par les risques hydriques, le soja, placée sous le climat intermédiaire de la station de Van Chan des doses d'irrigations de 20mm apportées au semis puis de 7 jours en 7 jours pour un nombre total d'irrigations variant entre zéro (aucune irrigation pratiquée) à 300mm (15 irrigations de 20mm tous les 7 jours depuis le semis). La dose de 20 mm pour 7 jours a été choisie comme valeur moyenne de l'évapotranspiration potentielle de référence pour 7 jours pendant la saison. Les résultats de cette expérimentation virtuelle sont montrés à la figure 3, pour les cas d'un sol sans et avec horizon compacté (plancher de rizière).

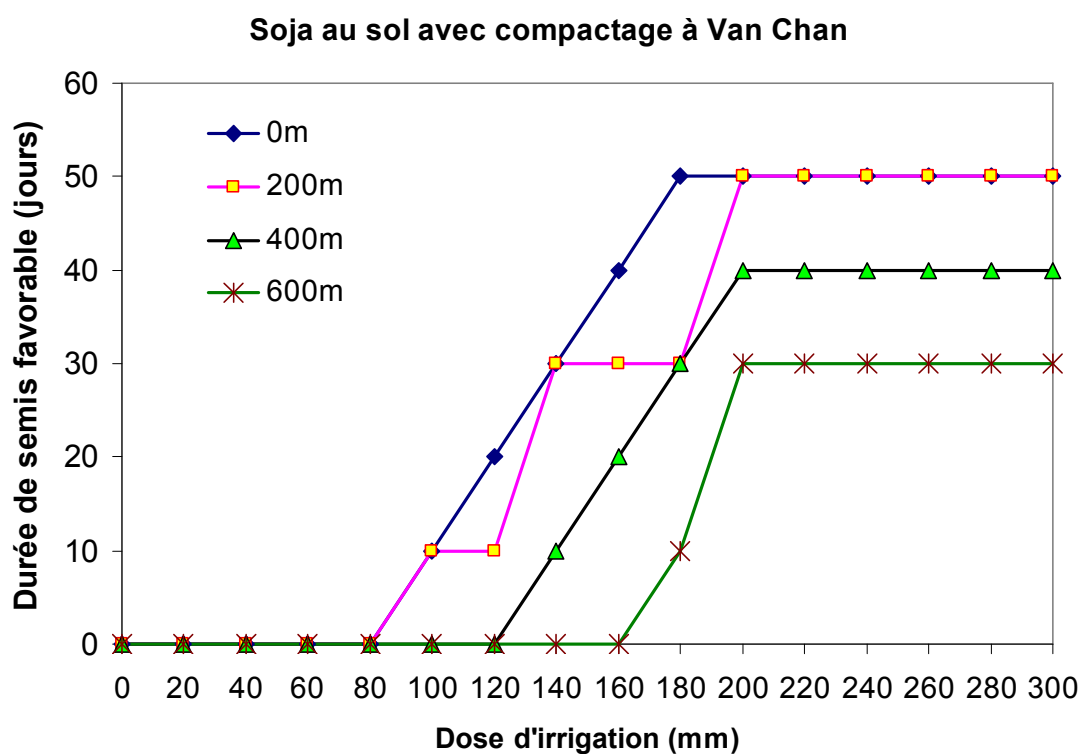
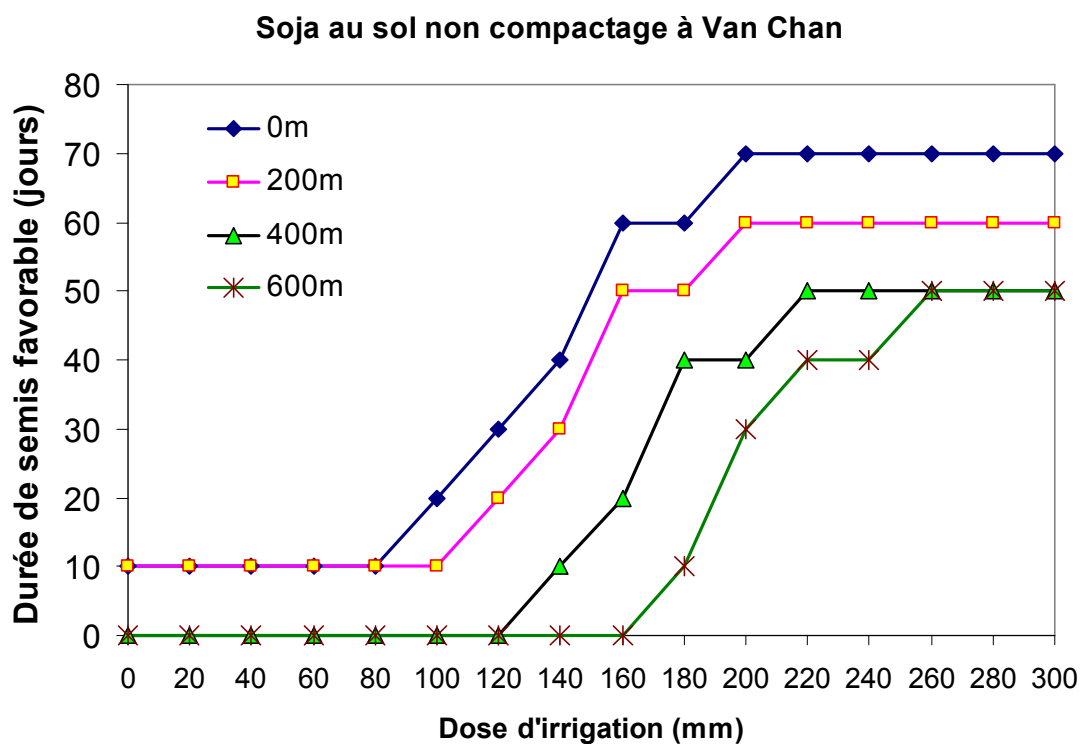


Figure 3. Taille de la fenêtre favorable aux semis en fonction de la dose totale d'irrigation apporté en un nombre n d'irrigations de 20 mm pratiquées de 7 jours en 7 jours depuis le semis, n variant de 0 à 15.

Le seuil d'irrigation à partir duquel la fenêtre de semis favorable est nettement augmentée varie assez peu en fonction de la présence ou non d'un plancher de rizière. Il est plus dépendant de l'altitude. Ce seuil est compris entre 80 mm (4 irrigations) et 160 mm (8 irrigations). Ce seuil n'est pas à considérer de manière absolue comme le bon niveau d'irrigation qui garantirait la réussite de la culture de soja, dans la mesure où il dépend du critère choisi pour accepter ou refuser l'écart de rendement, une année donnée, par rapport au rendement maximal atteint au cours de la série d'années, fixé dans notre travail à 70% du rendement maximal. Ce critère serait à ajuster sur la base d'un calcul économique du revenu généré par la culture. Néanmoins, ces seuils d'irrigations confirment que des quantités relativement modérées d'eau apportées en début de saison peuvent largement sécuriser la culture.

Ainsi, il serait judicieux de repérer géographiquement les cas où des irrigation de parcelles à tour de rôle pour une vingtaine de millimètres quelques fois en début de cycle suffiraient, en résolvant les problèmes de levée et de croissance en début de cycle, à élargir nettement la taille de la « fenêtre de semis ». Cela pourrait notamment concerner des terrasses aménagées sur versant à des altitudes relativement élevées, où le débit des cours d'eau les plus proches sont souvent faibles au printemps, dans les régions où le démarrage des précipitations susceptibles de prendre le relais et où d'alimenter ces cours d'eau, n'est pas particulièrement tardif, mais où c'est surtout la combinaison, en tout début de saison, de températures basses et de faibles pluviométries qui rend la fenêtre de semis particulièrement étroite. Si les données hydrologiques nécessaires sont disponibles, le modèle WaTRYsim pourrait facilement être employé pour des expérimentations virtuelles plus spécifiques visant à affiner la stratégie possible. Notons enfin que pour ces cas intermédiaires en termes de disponibilité de l'eau d'irrigation, la culture de riz « aérobie » pourrait devenir une option intéressante, sous réserve de réduire également les contraintes d'adventices souvent rapportées pour cette culture, et une fois améliorées les caractéristiques génétiques de qualité du grain qui limitent pour l'instant l'intérêt des producteurs pour cette option.

2.3. Serres tunnels pour les pépinières de riz irrigué conduit en repiquage

Nous avons vu au chapitre 2 que la « fenêtre de semis » était plus large pour la technique du semis en plein champ du riz irrigué que pour le riz repiqué. Cependant le semis en plein champ nécessite un contrôle très précis de la hauteur de lame d'eau après semis (Nguyen Duy Can and Xuan, 2000) qui est loin d'être toujours possible dans les rizières des montagnes du Vietnam (Jourdain et al., 2011). L'intérêt des pépinières sous serres tunnels pour réduire le risque que la maturité du riz irrigué repiqué soit trop tardive n'est plus à démontrer (Linguist et al., 2007). Elle est généralisée pour le cycle de riz d'hiver dans le delta du Fleuve Rouge. Dans les montagnes, son usage tend d'ailleurs à se développer avec le

soutien des pouvoirs publics. Il était donc judicieux d'évaluer la façon dont cette technique modifie les « fenêtre de semis » du riz irrigué. Nous avons élaboré pour cela un petit modèle empirique de la température moyenne journalière sous serre tunnel en fonction de la température de l'air tenant compte du rayonnement global et de la pluviométrie, cette dernière intervenant comme approximation de l'effet de l'humidité de l'air sur le bilan radiatif et thermique dans la serre. Ce modèle a été ajusté à des températures mesurées sous et hors de serres tunnel pratiquées en 2011 par un petit dispositif annexe mis en place dans les deux localités du dispositif de cette thèse :

$$T_{\text{moy_N}} = T_{\text{moy}} + (R_g/5.6) - 0.3 \cdot P + 2.6$$

Où: T_{moy} : température moyenne de l'air ; $T_{\text{moy_N}}$: température moyenne estimée sous serre tunnel ; R_g : Radiation globale (MJ.m^{-2}) ; P : Précipitation (mm)

Ce modèle fournit des estimations satisfaisantes de la température sous serre tunnel (figure 4).

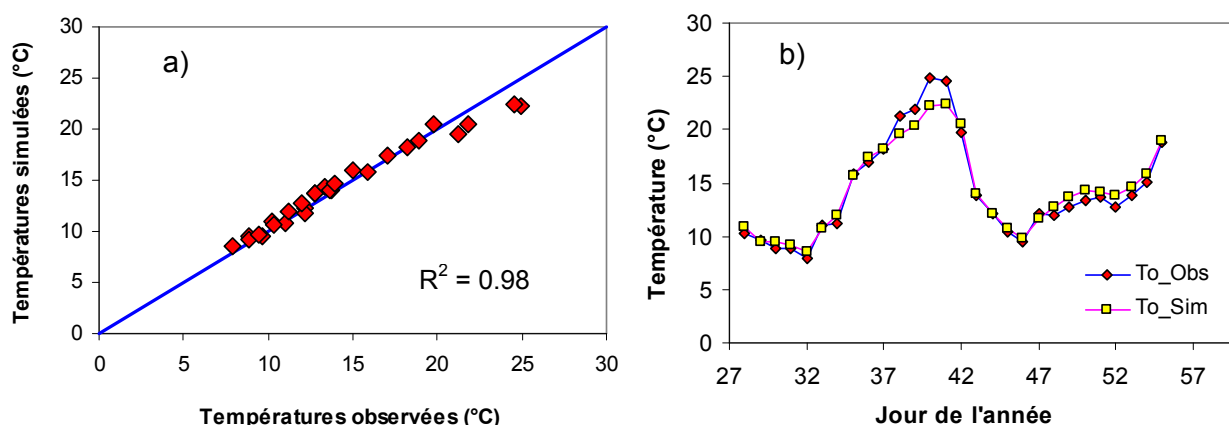


Figure 4. Valeurs observées et estimées sous serre tunnel des températures moyennes (28 jours d'observation) : a) Régression avec ordonnée fixée à l'origine ($R^2=0.98$; $RMSE = 0.96^\circ\text{C}$, $RRMSE = 0.07$), et (b) comparaison des évolutions au cours du temps. T_{0_Obs} : mesure sous serre ; T_{0sim} , valeur calculée avec le modèle empirique.

Ces estimations ont été substituées aux températures de l'air dans le modèle TRYsim pendant la durée de la phase pépinière pour les scénarios de riz irrigué repiqué qui avaient été simulés au chapitre 2. Les résultats obtenus montrent que par rapport à la pépinière à l'air libre, la serre tunnel permet d'augmenter la probabilité P2 d'éviter la mortalité due au froid. A Phu Ho aux altitudes inférieures ou égales à 600 m, elle augmente et devient toujours supérieure à 85 % alors qu'elle est de 55 % sans serre tunnel. A Van Chan aux altitudes supérieures à 600 m, la probabilité P2 devient toujours supérieure à 90 % avec

serre tunnel alors que sans serre tunnel elle n'atteint que 67 %. Cette probabilité est toujours de 100 % pour le climat plus chaud (à altitude identique) de Mu Cang Chai quelle que soit l'altitude de 0 à 1 000 m avec serre tunnel, alors que cette probabilité P2 était de 85 % sans recours à la serre tunnel à 1 000 m (figure 5)

De plus, la probabilité que la maturité du riz intervienne avant le 5 juillet est augmentée grâce au recours à la serre tunnel (figure 6). A titre d'exemple, cette probabilité était de 55 % à Phu Ho à 400 m pour le cas de pépinière à l'air libre, et devient 90 % grâce à la serre tunnel.

Il en résulte une augmentation très nette de la taille de la fenêtre favorable pour les semis du riz irrigué repiqué (figure 7). L'altitude à partir de laquelle la durée de cette fenêtre devient inférieure à 30 jours est augmentée de près de 200 m dans toutes les localités testées.

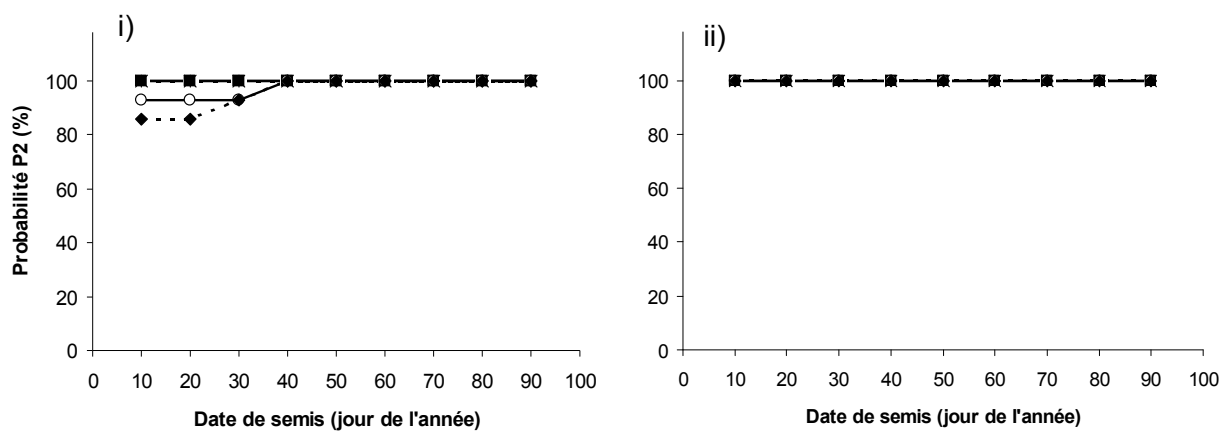
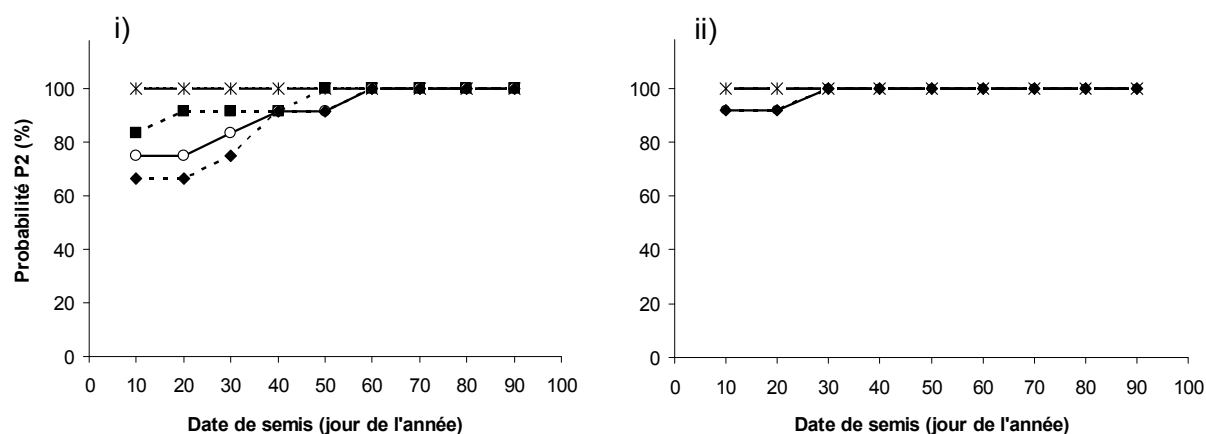
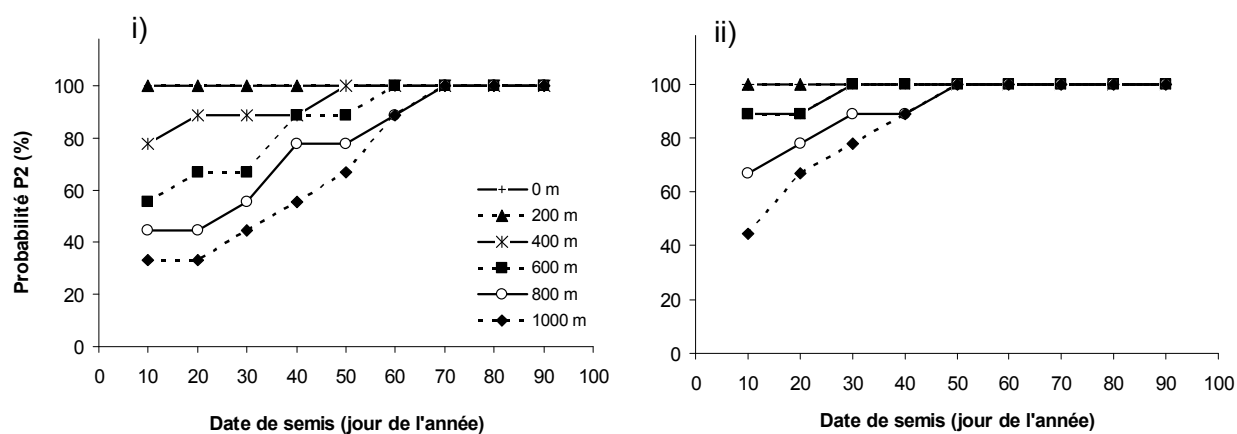


Figure 5. Probabilités P2 d'éviter la destruction de la culture de riz repiqué par le froid (i) sans et (ii) avec serre-tunnel en plastique pour la pépinière a) à Phu Ho ; b) à Van Chan ; c) à Mu Cang Chai

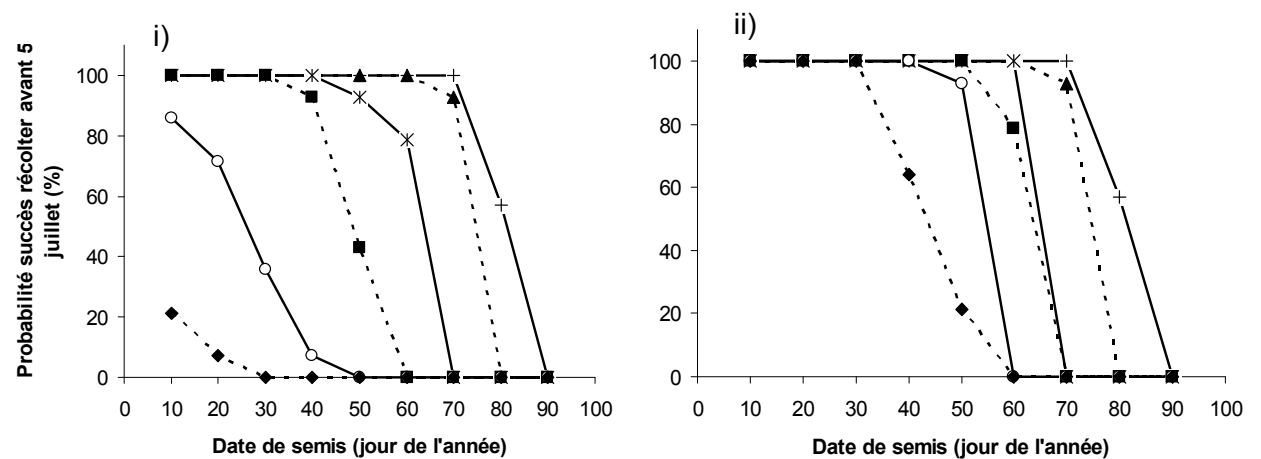
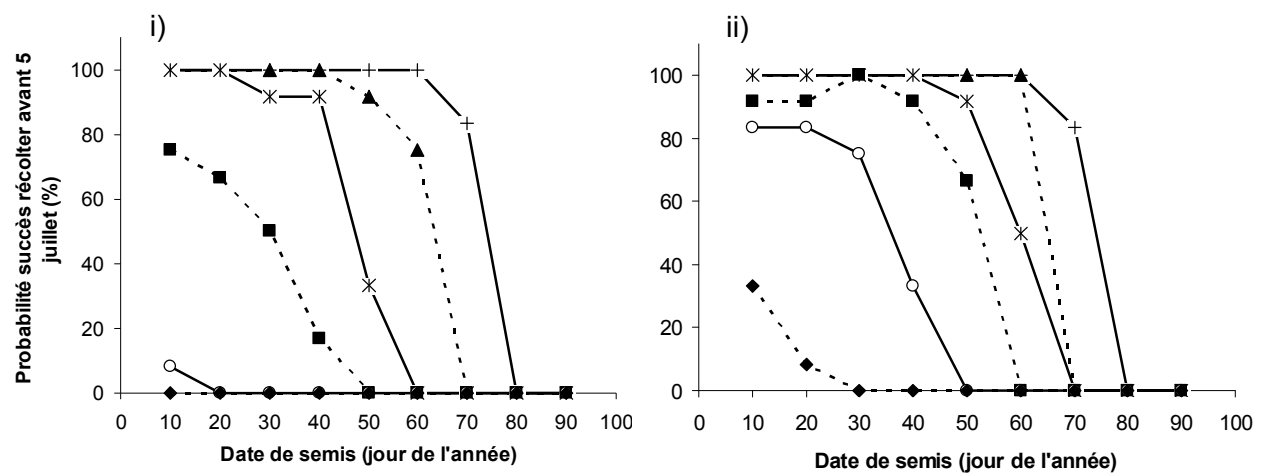
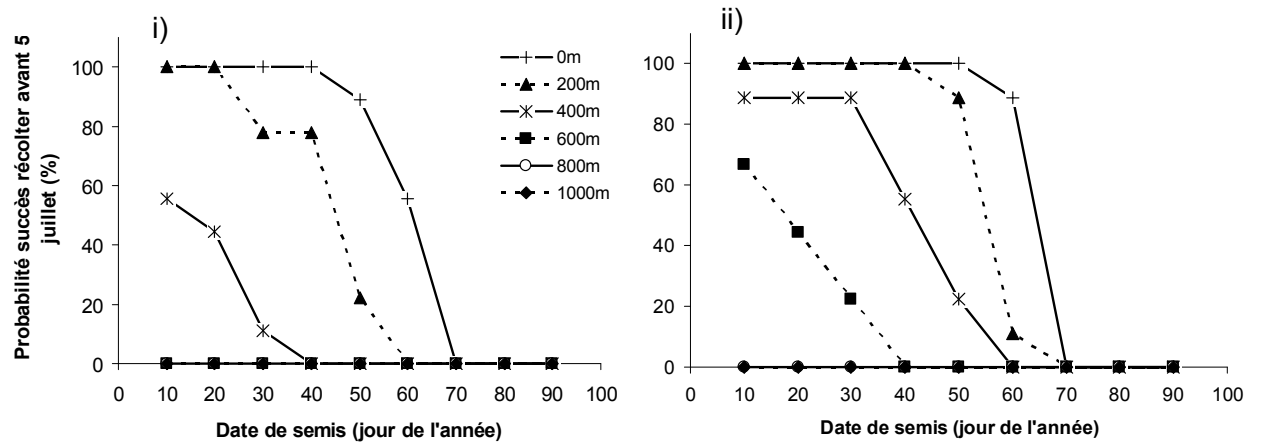


Figure 6. Probabilités (P_1) que la maturité du riz repiqué intervienne avant le 5 juillet de récolte le riz repiqué i) sans et (ii) avec recours à la serre tunnel. a) à Phu Ho ; b) à Van Chan ; c) à Mu Cang Chai

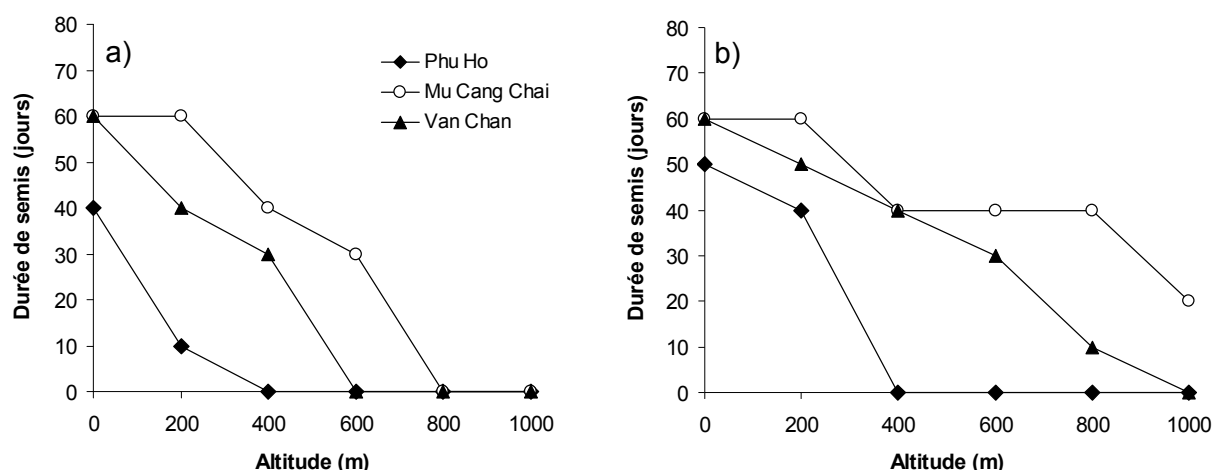


Figure 7 : Durée des fenêtres de dates de semis favorables pour le riz irrigué repiqué la pour les trois localités étudiées a) sans et b) avec recours à la serre tunnel pour la pépinière.

2.4. Réduction de l'évaporation par des mulchs en culture pluviale

La culture de printemps n'étant pas encouragée sur les versants non aménagés mais exclusivement sur les terrasses, les pertes par ruissellement ne sont pas en enjeu et cette fonction possible des mulchs pailleux n'est donc pas recherchée. Par contre, l'utilisation de mulchs pailleux ou plastique peut être envisagée pour réduire les pertes en eau par évaporation. Un modèle simple d'effet du mulch pailleux sur l'évaporation a été emprunté à Scopel et al. (2004) et ajouté au modèle WaTRYsim pour réévaluer certains scénarios de l'expérimentation virtuelle du chapitre 3 sous hypothèse de mulch de résidus d'une culture de riz. Ce modèle considère que le mulch intercepte chaque jour une part de la pluie, en fonction du pouvoir couvrant du mulch (relation entre la quantité de matière sèche du mulch et le taux de couverture du sol par ce dernier). Cette pluie interceptée est stockée dans la porosité du mulch à concurrence d'une capacité de stockage qui dépend du matériau employé. Cette capacité de stockage a été estimée à 2 mm/tonne pour les pailles de riz (Price et al., 1998). Elle serait légèrement supérieure à cela pour le cas du maïs estimée à 2.2 mm/tonne (Scopel et al., 2004). L'évaporation potentielle est répartie entre le mulch et le sol en fonction de la quantité de mulch et d'un coefficient d'extinction propre au type de mulch. L'évaporation de l'eau contenue dans les pailles est calculée en appliquant l'évaporation potentielle jusqu'à épuisement du stock en eau du mulch. L'évaporation du sol est calculée de la même manière que pour un sol nu mais en appliquant comme évaporation potentielle la part de cette évaporation non « interceptée » par le mulch.

En appliquant ce modèle pour le cas d'un mulch constitué de 3 t/ha de pailles de riz, on constate (tableau 1) que l'évaporation totale simulée du mulch et du sol est très voisine de

l'évaporation du sol en absence de mulch pour les trois localités testées et la plupart des dates de semis, notamment les plus précoces qui constituent celles pour lesquelles il y a un enjeu à réduire les pertes par évaporation. En conséquence, les rendements simulés et les dates de maturité ne sont pratiquement pas modifiés lorsqu'on introduit ce type de mulch dans les simulations. Cela provient du fait que les précipitations de début de saison sont presque toutes de petites précipitations, de 2 à 10 mm, et que la part de ces précipitations interceptées par le mulch puis évaporées correspond à peu près à la quantité d'eau qui n'est pas évaporée à partir du sol du fait de la protection de ce dernier par le mulch. En outre, le nombre d'années où l'état hydrique du sol devient plus favorable à la levée que sans mulch est identique (Figure 8.b, cas de Phu Ho) voire inférieur (Figure 8.a cas de Van Chan) au nombre d'années où les petites précipitations étant intégralement stockés par le mulch, l'état hydrique de la partie du sol où se trouvent les semences est plutôt moins favorable et la levée est retardée. Un résultat de ce type, lié à des pluies faibles, avait déjà été observé ailleurs par Bussière et Cellier (1993).

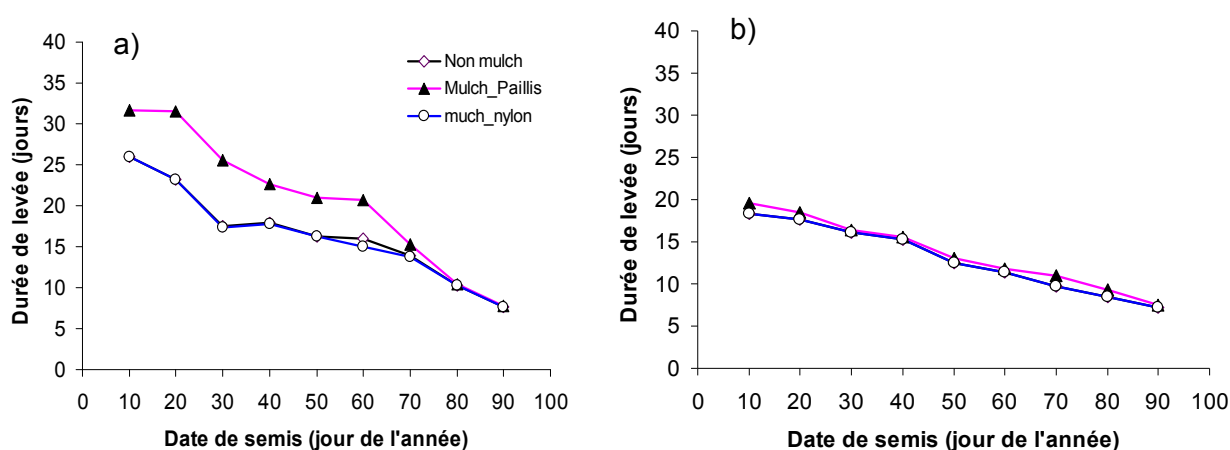


Figure 8 : Influence simul e d'un mulch (3t/ha de paille de riz et mulch plastique théorique (« nylon ») sur la durée de lev e d'un maïs : a) Van Chan 600m ; b) Phu Ho 600m

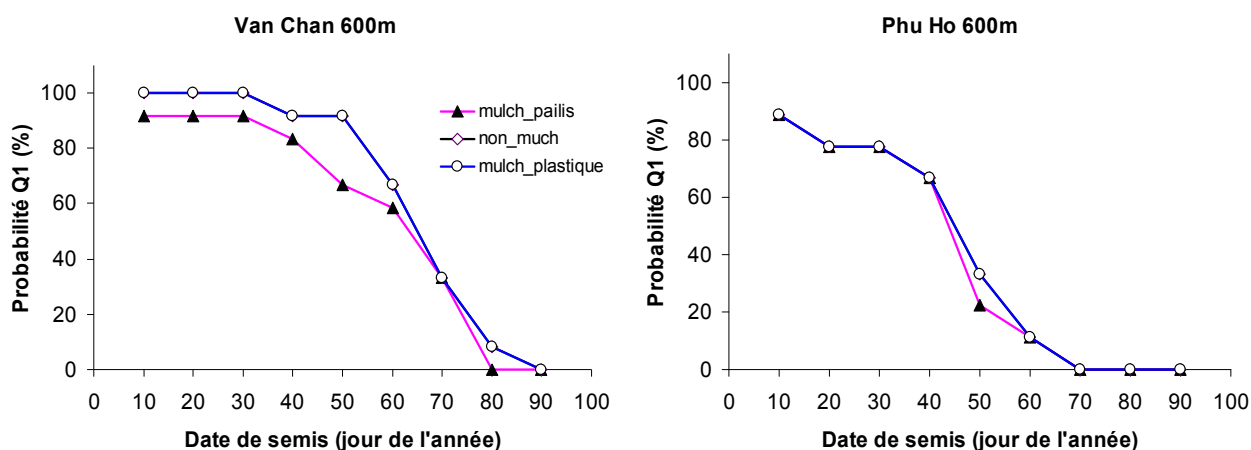


Figure 9 : Influence simulée d'un mulch (3t/ha de paille de riz et mulch plastique théorique) pour la probabilité Q1 (récolte avant le 5 juillet) d'un maïs sous le climat de Van Chan 600m et Phu Ho 600m

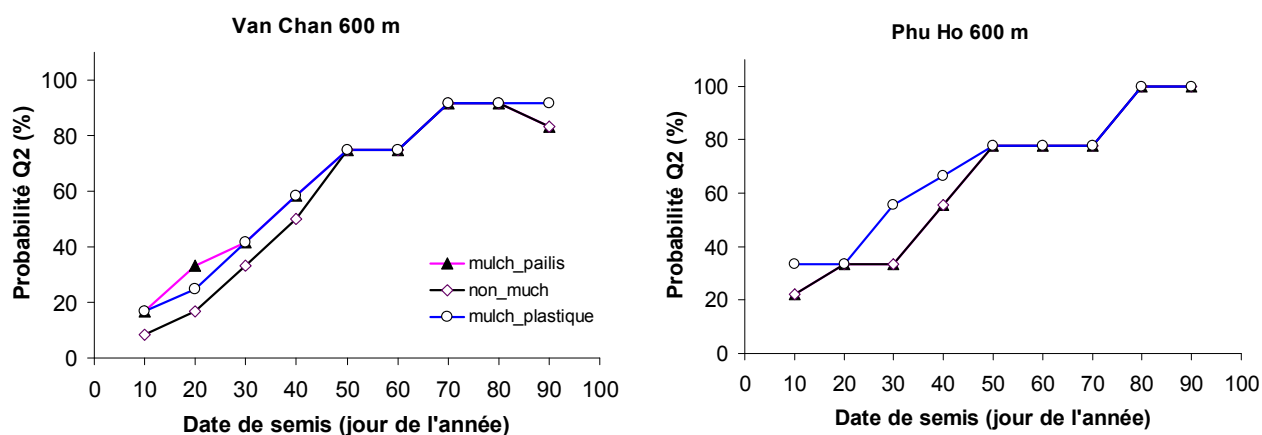


Figure 10 : Influence simulée d'un mulch (3t/ha de paille de riz et plastique) pour la probabilité Q3 que le rendement dépasse 70% du rendement maximal d'un maïs sous le climat de Van Chan 600m et Phu Ho 600m

En plus de ces résultats, nous avons considéré un mulch plastique hypothétique « parfait », qui stopperait entièrement l'évaporation du sol tout en laissant passer vers le sol toutes les précipitations au voisinage du rang ensemencé. Dans ce cas, les simulations indiquent effectivement une réduction de l'évaporation totale (tableau 1) ayant elle-même pour effet une réduction du temps de levée (figure 8) qui se traduit par une probabilité plus élevée d'atteindre la maturité avant le 5 juillet pour les semis précoces (Figure 9). La réduction de l'évaporation permet aussi une réduction des stress hydriques se traduisant par une légère

augmentation des rendements des semis pratiqués avant l'en 50^e jour de l'année (Figure 10). Ces effets restent modestes mais conduisent à une fenêtre de semis augmentée de l'ordre de 10 jours par ces mulchs plastiques théoriques, aux altitudes inférieures à 400 m, ce qui n'est pas complètement négligeable. Les mulchs pailleux, quant à eux, ne permettent pas d'agrandir, voire diminuent la taille de la fenêtre de semis (figure 11).

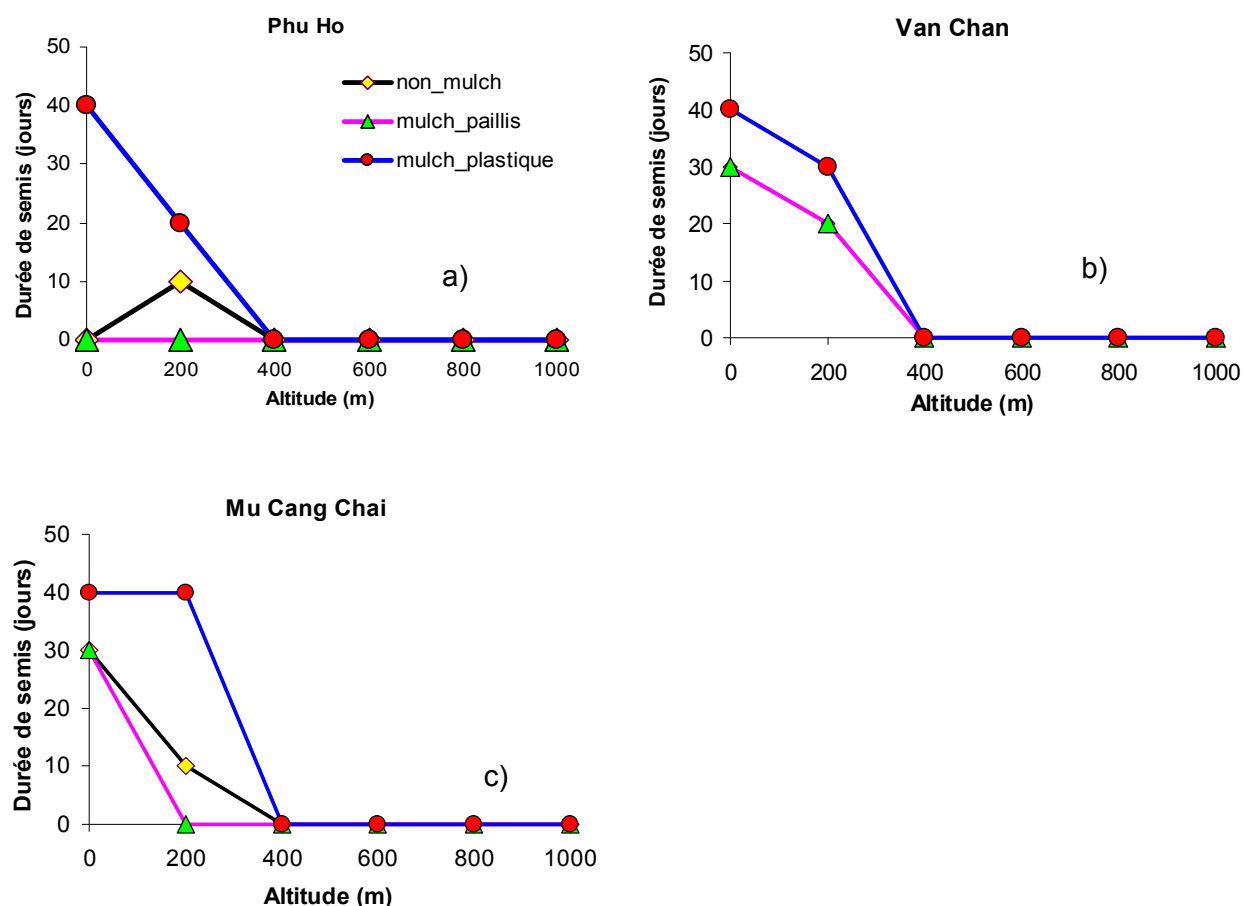


Figure 11 : Influence du mulch sur la durée de la période favorable (probabilités Q1 et Q3 simultanément supérieures à 80 %) pour semer le maïs. a) Phu Ho, b) Van Chan, c) Mu Cang Chai

Tableau 1. Evaporation accumulée pendant la durée du cycle de maïs sous différentes modalités : mulch paille, mulch nylon et sans mulch

| Date de semis | Estimation de l'évaporation estimée | | | Différentiel par rapport au sans mulch | |
|----------------------|-------------------------------------|-------|--------|---|--------|
| | sol | mulch | totale | totale | sol |
| Sans mulch | | | | | |
| 10 | 428.2 | 0.0 | 428.2 | | |
| 20 | 419.0 | 0.0 | 419.0 | | |
| 30 | 415.3 | 0.0 | 415.3 | | |
| 40 | 409.8 | 0.0 | 409.8 | | |
| 50 | 404.9 | 0.0 | 404.9 | | |
| 60 | 397.7 | 0.0 | 397.7 | | |
| 70 | 392.4 | 0.0 | 392.4 | | |
| 80 | 384.1 | 0.0 | 384.1 | | |
| 90 | 372.1 | 0.0 | 372.1 | | |
| Mulch paille (3T/ha) | | | | | |
| 10 | 353.3 | 83.3 | 436.6 | 8.4 | -74.9 |
| 20 | 339.3 | 85.0 | 424.3 | 5.3 | -79.7 |
| 30 | 333.2 | 88.3 | 421.4 | 6.1 | -82.1 |
| 40 | 325.0 | 92.3 | 417.3 | 7.5 | -84.8 |
| 50 | 321.2 | 95.6 | 416.8 | 11.9 | -83.7 |
| 60 | 309.0 | 98.2 | 407.2 | 9.4 | -88.7 |
| 70 | 299.7 | 101.4 | 401.2 | 8.7 | -92.7 |
| 80 | 289.3 | 103.3 | 392.6 | 8.5 | -94.8 |
| 90 | 274.2 | 103.8 | 377.9 | 5.8 | -98.0 |
| Mulch nylon | | | | | |
| 10 | 249.7 | 0.0 | 249.7 | -178.5 | -178.5 |
| 20 | 243.8 | 0.0 | 243.8 | -175.2 | -175.2 |
| 30 | 240.3 | 0.0 | 240.3 | -175.0 | -175.0 |
| 40 | 237.7 | 0.0 | 237.7 | -172.1 | -172.1 |
| 50 | 235.2 | 0.0 | 235.2 | -169.7 | -169.7 |
| 60 | 231.4 | 0.0 | 231.4 | -166.3 | -166.3 |
| 70 | 229.0 | 0.0 | 229.0 | -163.4 | -163.4 |
| 80 | 224.2 | 0.0 | 224.2 | -159.9 | -159.9 |
| 90 | 218.6 | 0.0 | 218.6 | -153.5 | -153.5 |

Les effets thermiques des mulchs pourraient également être considérés, puisqu'ils peuvent augmenter la température du sol lorsque les températures de l'air sont basses, avec un effet favorable sur la levée (Easson and Fearnough, 2000; 2003; Ghosh et al., 2006; Ramakrishna et al., 2006). Cependant, dans la mesure où en culture pluviale, on a vu au chapitre 3 que les retards de levée étaient surtout dus à l'état hydrique du sol, et dans la mesure où cet état hydrique a peu de chances d'être amélioré par un mulch pailleux, l'impact à espérer de cette technique restera probablement assez faible même si l'on tient compte de son effet thermique sur le sol. Un autre effet des mulchs qui peut être important à considérer pour la culture de printemps est la réduction de la pression des adventices. Tous nos résultats précédents montrent que la culture de printemps est caractérisée par un risque élevé de levée retardée et / ou de croissance lente de la culture en début de cycle. Ces conditions sont très favorables à la prolifération des adventices qui sont susceptibles d'aggraver considérablement les contraintes climatiques identifiées dans notre travail. Les mulchs pailleux sont souvent cités comme capables de réduire à long terme la pression des mauvaises herbes malgré une prolifération plus importante les premières années (Stevoux, 2000). Cependant cet effet n'est obtenu que pour des quantités de paillis très importantes, proches de 7t.ha⁻¹ de matière sèche, de manière à constituer une couche faisant physiquement obstacle à la croissance des adventices. Avec des paillis moins épais, la contrainte enherbement est au contraire augmentée car le mulch complique les interventions de lutte sans empêcher la croissance des adventices. Mais avec des paillis très épais, le phénomène de stockage de l'eau de pluie dans la porosité des pailles, et son évaporation, risque d'être plus encore important que dans nos expérimentations virtuelles complémentaires ci-dessus et risque donc d'agir plutôt davantage vers la réduction de la taille de la fenêtre de semis. On retiendra donc que les mulchs pailleux ont peu de chances d'être des techniques capables de favoriser la culture de printemps dans les montagnes du Vietnam. Le mulch plastique n'est pas pour autant à écarter de cette manière. Modélisé sous une forme un peu idéalisée, ses effets hydriques sont plutôt favorables. Il est probable qu'il ait aussi un effet thermique et un effet anti adventices tous deux aussi favorables. Dans les conditions de rizières en terrasses avec diguettes, il paraît possible de disposer des bandes de plastiques entre les rangs ou de ménager des trous et d'y semer en poquets, de telle sorte qu'on ait bien infiltration complète des pluies ou des apports d'irrigation de début de cycle par les trous ou les rangs, et une évaporation et une pression d'adventices très faibles grâce au plastique. Des expérimentations réelles de cette technique seraient à conduire pour mieux en identifier les avantages et contraintes agronomiques, y compris en terme de temps de travail comparé à celui de la gestion technique actuelle des parcelles au printemps.

3. Conclusion

Une marge de manœuvre existe pour augmenter la possibilité de réaliser une culture supplémentaire au printemps malgré les basses températures et la faible pluviométrie. Les techniques agissant directement sur la température ou l'offre en eau en début de saison, respectivement serres-tunnel et irrigation sont à priori clairement efficaces, mais leur pertinence dépend du bilan économique de la culture, comparé non pas seulement à celui d'une culture de printemps conduite sans recourir à ces techniques, mais aussi à d'autres options accessibles aux agriculteurs à cette saison sans omettre les opportunités de revenu extra-agricole. En effet, il est possible que la culture de printemps même risquée en termes de marge brute à l'ha soit plus efficace pour contribuer au revenu et à la sécurité alimentaire des familles sans recours à l'irrigation ou aux serres tunnel, si ces techniques requièrent la mobilisation d'une trésorerie et d'une force de travail qui serait mieux valorisée, à ce moment là, par une autre activité. Notre modèle peut être utile pour mieux évaluer ex-ante les stratégies mobilisant des serres tunnel ou l'irrigation, en fonction des climats locaux et des espèces envisagées, mais aller plus loin que nous l'avons fait dans ce but au cours de ce chapitre n'aurait pas grand sens sans intégrer les contraintes économiques des exploitations dans l'analyse, et, dans le cas de l'irrigation, les contraintes hydrologiques.

La sélection de variétés ayant des températures bases de développement plus faibles est aussi une voie importante de réduction de la contrainte climatique au printemps, mais il faudra aussi tenir compte de probables baisses du rendement potentiel des cultures avec la réduction de leur durée de cycle. Agir de quelques degrés sur le seuil léthal de basses températures ne procurerait pas d'avantage notable.

Les mulchs pailleux n'offrent pas de perspectives prometteuses. Par contre le mulch plastique est une option qui mérite d'être étudiée plus avant, par des expérimentations réelles dans lesquelles elles seraient comparées à une gestion conventionnelle avec et sans éliminer la contrainte enherbement, de manière à évaluer l'effet de cette technique spécifiquement lié à son effet sur l'enherbement, susceptible de s'ajouter aux faibles effets favorables que nous avons identifiés comme possibles sur la contrainte hydrique.

Tableau 2. Synthèse des possibilités de réduire la contrainte climatique par le système de culture.

| Technique | Efficacité | Contraintes technico-économiques | Recherche (R) ou Ingénierie (I) complémentaire |
|------------------------|--|--|--|
| Serre tunnel | Permet de « gagner » au moins 200 m d'altitude ou augmente d'au moins 10 jours la taille de la fenêtre de semis | Cout du matériel (faible) | Déjà en cours de diffusion chez les agriculteurs. Eventuellement (I) : calcul d'impact sur marge brute/ha et par unité de travail, opportunité comparée avec autres options de revenu des exploitations |
| Variétés à cycle court | Impact potentiellement élevé sur les fenêtres de semis de baisse de quelques degrés de la température base de développement. | Baisse simultanée du rendement potentiel probable | (R) : sélection variétale |
| Irrigation | Des irrigations modérées en début de cycle agrandissent fortement la taille de la fenêtre de semis (plus de 30 jours) | Dépendantes de ressources en eau. Eventuellement contraintes d'organisation collective d'accès à et de répartition de la ressource. | (I) : calcul économique parcelle/ exploitation (cf Serre tunnel), évaluation spatialisée des doses optimales en fonction des contraintes économiques et hydrologiques. |
| Mulch plastique | Augmente d'au moins 10 jours la fenêtre de semis favorable. Effet thermique et anti adventices probable, susceptible d'augmenter l'intérêt de la technique | Cout du matériel (faible). Surcroit de main d'œuvre pour installation, peut être compensé par réduction de la lutte contre adventices. | (R) : influence du mulch plastique sur la température du sol et les adventices dans le contexte des cultures de printemps. (I): calcul économique parcelle/ exploitation. |
| Mulch pailleux | Intérêt nul pour réduction des risques hydriques des cultures de printemps. Effet thermique et anti-adventices non démontré. Probablement faible | Changement important des flux de biomasse, travail et trésorerie dans l'exploitation | (R) : influence du mulch sur la température du sol, les adventices dans le contexte des cultures de printemps. (I) (selon résultats recherches ci-dessus): calcul économique parcelle/ exploitation. |

Chapitre 5 : Discussion générale et conclusion

1. Rappel des partis pris méthodologiques et des principaux résultats

L'objectif de cette thèse était d'évaluer sur le plan agroclimatique les options de réalisation d'une culture de printemps dans les hautes vallées du Nord du Vietnam. A partir d'hypothèses sur les contraintes agroclimatiques s'exerçant sur ces options, la démarche générale était de construire à la fois un modèle de simulation et le dispositif expérimental permettant de le caler et de l'évaluer, puis d'utiliser ce modèle pour une expérimentation virtuelle remplaçant les cultures de printemps dans le climat de régions contrastées sur ce plan, le long d'un gradient d'altitude, et sous différentes modalités techniques notamment de dates de semis. Cette démarche (figure 1) a été appliquée successivement aux deux grands cas rencontrés dans les montagnes : irrigation des parcelles dès le printemps, et conduite en régime pluvial (irrigation praticable seulement pour le cycle estival). Elle a conduit à identifier, pour chaque région et culture, et pour chacun de ces deux cas relatifs à la possibilité d'irriguer, des « fenêtres de semis favorables », c'est-à-dire des intervalles de dates de semis pour lesquelles la culture de printemps présente peu de risques. La taille de cette fenêtre constitue ainsi un indicateur synthétique de la contrainte climatique pour une culture donnée dans un lieu donné : plus cette fenêtre est étroite, plus on peut s'attendre à ce qu'il soit délicat pour les producteurs de pratiquer la culture.

Dans ce qui suit, nous discutons d'abord cette démarche, puis les résultats qu'elle a permis d'obtenir, leur validité et leurs conséquences pour la problématique agricole de la région d'étude. Ensuite, nous explorons les techniques culturales susceptibles de réduire l'impact de la contrainte climatique. Enfin nous déduisons de cette thèse son prolongement en termes de perspectives pour la recherche agricole.

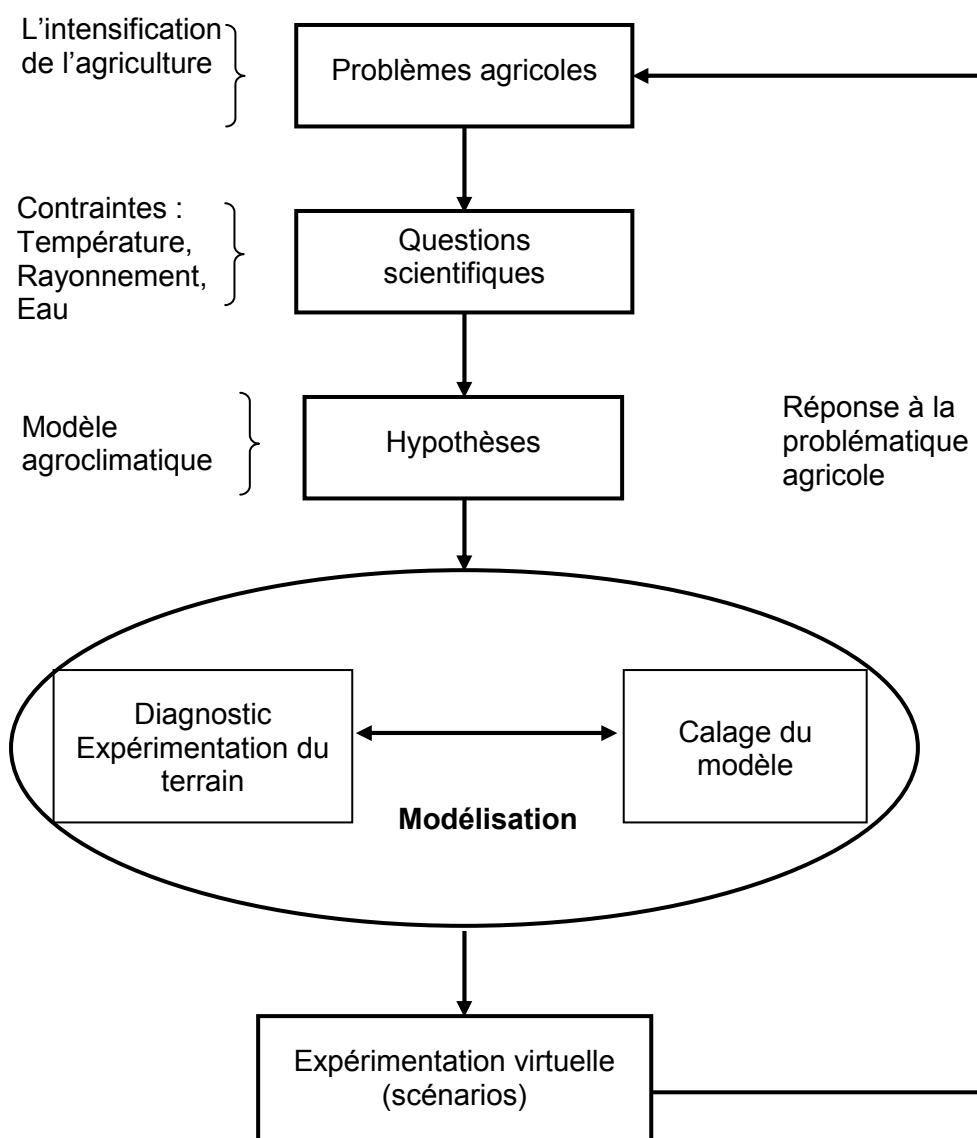


Figure 1: Rappel de la démarche générale exposée au chapitre 1.

2. Méthode employée

Nous avons opté pour une modélisation *ad hoc* du système sol-plante-atmosphère au printemps. Une alternative à ce choix aurait pu être d'identifier un modèle « générique » dont le domaine de validité aurait contenu le contexte agronomique de cette thèse. Certains lecteurs pourraient trouver qu'un tel choix aurait rendu plus facile à légitimer la méthode d'évaluation du modèle qui a été retenue : calage et évaluation grâce à un dispositif expérimental construit dans ce but spécifique, sans indépendance entre le jeu de données utilisé pour le calage et celui utilisé pour l'évaluation.

Le choix de ne pas utiliser un modèle générique fondé déjà sur ces formalismes résulte des arguments suivants :

- aucun modèle de ce type n'avait déjà été évalué pour un contexte similaire à celui de notre thèse, la généricité ne présentant donc pas d'avantage particulier de ce point de vue ;
- les modèles génériques candidats étaient tous d'une complexité supérieure à ce qui était nécessaire pour notre étude, en termes de processus simulés, prenant en compte par exemple les stress azotés, les phénomènes de ruissellement ou l'impact de températures très élevées, rendant la compréhension de leurs aspects mathématiques et informatiques, ainsi que les opérations de calage, plus difficiles que nécessaire ;
- aucun modèle générique candidat n'était disponible sous une forme informatique efficace pour la simulation de milliers de scénarios tels que nécessaires.

En revanche, tous les composants des modèles construits et employés dans ce travail utilisent des formalismes qui ont fait la preuve, à travers de nombreux travaux, de leur efficacité à prédire au pas de temps journalier le comportement de la partie du système sol-plante-atmosphère sur lesquels ils portent :

- développement phénologique en fonction du temps thermique,
- analogie entre la culture et une « grosse feuille » interceptant la lumière selon une loi d'extinction de type loi de Beer,
- conversion du rayonnement intercepté en biomasse en appliquant un coefficient d'efficience de conversion sous la dépendance de la température et réduit par le stress hydrique éventuel,
- répartition de la biomasse vers le grain à l'aide d'un indice de récolte et calcul du « puits » que constituent les grains en tenant compte de la vitesse de croissance pendant la phase de formation des grains,
- bilan hydrique fondé sur l'analogie réservoir.

Toutes ces approches ont été évaluées dans des conditions extrêmement variées et l'expérience accumulée permet de dire que l'on se situait dans leur domaine de validité : variétés non photosensibles, cultures pures et semées suivant une géométrie régulière à densité de peuplement constante, absence de ravageurs et d'adventices, et pour le cas du bilan hydrique des cultures pluviales, situations sans ruissellement et sols sans argiles gonflantes.

De plus, nous avons pris soin d'évaluer le modèle après calage par des comparaisons entre variables simulées et observées pour des variables intermédiaires telles que le LAI, la biomasse aérienne totale ou le stock hydrique du sol, et non pas seulement pour les variables d'intérêt directement utiles à l'analyse qu'étaient la durée du cycle, la mortalité et le rendement. De plus, ces comparaisons ont porté non pas sur des données mesurées à une date particulière mais sur leur dynamique au cours du cycle. De cette manière on réduisait

les risques que le bon accord entre modèle et observations, obtenu sur les variables d'intérêt, fût le résultat d'erreurs se compensant d'un composant du modèle à un autre, mais témoignât bien de la cohérence du modèle.

Cela dit, c'est sur l'impact des basses températures sur la survie et le rendement de la culture qu'il aurait été le plus justifié de procéder à une évaluation du modèle sur des données indépendantes de celles utilisées pour son calage, et cela quel que soit le modèle choisi. Comme indiqué au chapitre 2, les paramètres de sensibilité à la mortalité au froid des cultivars ont été fixés à des valeurs fournies dans la littérature qui suggère que ces paramètres sont connus :

- à quelques degrés près pour la température seuil au-dessous de laquelle la survie de la culture est menacée ;
- à un ou deux jours près pour la durée létale d'exposition à cette température.

Améliorer la précision du calage de ces paramètres ou connaître avec précision les risques que le modèle simule par erreur une mort ou une survie de la culture aurait nécessité un dispositif plaçant des cultures dans des conditions de température encore plus variées que ce que nous avons obtenu dans notre dispositif. Cela aurait été raisonnablement possible, du point de vue matériel, en chambre de végétation où l'on aurait pu contrôler la température artificiellement. Les biais de changement d'échelle entre celle du vase de végétation et celle du champ ne sont pas négligeables ; cette approche aurait alors requis de valider également un modèle correctif de ce changement d'échelle. En alternative, le type de dispositif que nous avons utilisé pourrait être maintenu en place quelques années supplémentaires, au moins pour certaines des modalités (culture, date de semis, localisation) de manière à affiner le calage du modèle à mesure que s'accumule une plus grande diversité des conditions climatiques auxquelles sont exposées les cultures. La discussion du chapitre 2 nous a conduits à retenir que si les simulations de la mortalité des cultures sous températures basses sont biaisées dans TRYsim, c'est plutôt par sous-estimation que par surestimation du risque de destruction de la culture. D'une manière générale, tout le calage du modèle a été conduit avec le parti pris de privilégier plutôt la sous-estimation des effets des contraintes climatiques sur la durée du cycle, la survie et le rendement, que leur surestimation lorsque les données de calage n'étaient pas suffisantes pour garantir un calage sans biais. Les conséquences de ce parti pris sur les recommandations qui pourraient être déduites de cette thèse à l'attention des agriculteurs et des pouvoirs publics seront discutées dans la section suivante.

Les données climatiques mobilisées dans cette thèse proviennent de stations météorologiques du service public Vietnamiens. Les séries historiques de données complètes et cohérentes dépassent rarement une dizaine d'années pour ces stations. Or le minimum suffisant pour représenter un climat dans toutes ses variations inter-annuelles serait plutôt de

l'ordre de la quinzaine d'années, l'organisation mondiale de météorologie recommandant même 30 années comme le compromis entre un objectif d'appréhender la variabilité et celui d'éviter le biais lié au fait qu'un climat n'est jamais stable mais évolue sur le long terme. Il est donc possible que nos résultats ne tiennent qu'imparfaitement compte de la variabilité climatique réelle de la région étudiée, même si nos expérimentations virtuelles permettent de le faire beaucoup mieux que les seules expérimentations réelles nécessairement limitées à un nombre d'années encore plus insuffisant. Nous espérons qu'en montrant, par ce type de travaux, l'intérêt de disposer de données climatiques fiables et continues sur de nombreuses années, cette thèse contribuera à renforcer l'effort des services de météorologie du Vietnam pour produire de telles données.

Pour évaluer l'interaction entre le climat et une proposition d'innovation dans les systèmes de culture, la méthode employée dans cette thèse recourt à des critères de réussite de la culture et une analyse probabiliste de ces critères. Cet aspect de l'approche débouche sur un indicateur de contraintes climatiques : la taille de l'intervalle des dates de semis pour lesquelles, dans une localisation et pour une espèce donnée, les critères probabilistes de réussite sont satisfaits. La définition des critères liés à la durée du cycle et au rendement ont fait appel à certains partis pris.

Concernant la durée du cycle, en s'appuyant sur la pratique actuelle du cycle d'été par les producteurs, il a été défini une date butoir à laquelle le cycle de printemps doit laisser la place au cycle d'été. On aurait aussi pu considérer que, sans fixer une telle date butoir, et bien que cela réduise la productivité du cycle d'été, la somme des productions de printemps et d'été pouvait être économiquement plus avantageuse. La méthode employée ici pourrait aisément être étendue de manière à tester cette hypothèse en évaluant par simulation la somme des rendements de deux cycles de culture en séquence, en faisant varier non plus seulement la date de semis de la culture de printemps, mais également l'intervalle en jours entre les deux cultures. Cela supposerait un calage préalable du modèle TRYSim pour les cultivars de riz utilisés en été, calage relativement peu coûteux à réaliser car portant essentiellement sur les constantes thermiques.

Le critère du rendement a été défini en considérant qu'un rendement était défavorable s'il était inférieur à 70 % du rendement le plus élevé estimé pour l'ensemble des dates de semis testées pour la culture et sa localisation. Choisir un seuil plus bas ou plus élevé conduirait à élargir ou réduire, respectivement, l'intervalle des dates de semis jugées favorables pour la culture de printemps.

De même, le niveau de probabilité fixé pour classer un scénario comme favorable selon chacun des critères considérés, peut conduire à réduire ou augmenter l'intervalle de dates de semis favorables selon que cette probabilité est augmentée ou réduite, respectivement,

par rapport à la valeur de 0.8 que nous avons retenue (qui correspond à 8 années au moins où le scénario satisfait au critère considéré sur les 10 années simulées).

Cependant, le caractère quelque peu arbitraire des seuils ainsi fixés pour les critères comme pour ces probabilités ne change pas la façon dont se classent les cultures et les climats de référence par rapport à la faisabilité d'une culture pendant la saison de printemps. Les valeurs retenues ont permis de bien discriminer les situations où le climat n'est ni nettement favorable ni nettement défavorable à la culture de printemps : ces valeurs étaient donc adaptées à notre objectif.

3. Validité des résultats et leurs conséquences pour la problématique agricole

Les résultats de la thèse confirment que même lorsque l'eau d'irrigation est abondante, le climat des montagnes du Vietnam ne permet pas de pratiquer partout une culture de printemps sans les trois risques suivants : destruction par le froid durant la phase de croissance végétative, allongement du cycle au-delà de la date où le riz irrigué doit être installé selon la pratique actuelle, rendements abaissés à cause du rayonnement global et de la température faibles pendant la première partie de la saison. Pour ce contexte irrigué, la culture qui échappe le mieux à ces contraintes est le soja, suivie du maïs et du riz conduit en semis en plein champ. Le riz semé en pépinière et repiqué est apparu comme le plus sensible aux contraintes de température. En conditions pluviales, la culture de printemps est nettement plus délicate à réussir à cause des retards de levée que les faibles précipitations de début de saison risquent d'induire, mais aussi à cause des stress hydriques fréquents pendant la phase de croissance végétative, stress éventuellement aggravés ou étendus à la phase sexuée du cycle lorsque la culture est pratiquée en rizière où la présence du plancher imperméable réduit le volume de sol exploitable par les racines. Le soja reste certes la culture pour laquelle la contrainte de durée de cycle est la plus faible, mais son rendement est fortement réduit par les stress hydriques. Le riz « aérobique » et le maïs sont des options envisageables en conditions strictement pluviales aux altitudes relativement modestes dans tous les climats étudiés. Ces éléments devraient conduire les pouvoirs publics à reconnaître que les réticences de certaines populations à suivre les recommandations de développer la culture de printemps ne sont pas nécessairement de nature culturelle ou liées à un niveau d'éducation insuffisant mais peuvent trouver leur source dans des contraintes climatiques objectives.

Au-delà de ces affirmations sur l'existence de la contrainte climatique et sa classification générale en fonction des espèces cultivées, affirmations que l'on peut assortir d'une confiance élevée, notre étude fournit des « fenêtres de dates de semis favorables » pour chacune des cultures étudiées et pour les trois climats de référence considérés. Ces « fenêtres de semis » tiennent compte de l'altitude à laquelle la culture est envisagée dans

l'aire de représentativité de chacune des stations climatiques de référence. Trois stations climatiques contrastées ont été traitées, mais le service public Vietnamien de météorologie dispose de plus d'une dizaine de stations réparties à travers tout le territoire montagneux et pour lesquelles des données historiques sont disponibles. S'assurer de la qualité de ces données et identifier les aires de représentativité régionale de ces stations relèvent de la climatologie, et étendre nos expérimentations virtuelles à l'ensemble de ce réseau de station est en dehors du champ de cette thèse. Mais ce travail d'ingénierie agroclimatique pourrait être envisagé comme une application des connaissances élaborées et assemblées dans cette thèse, au service d'une meilleure identification des situations favorables ou défavorables à la culture de printemps dans la région, voire dans les régions montagneuses voisines au Laos, en Thaïlande ou dans le Yunnan chinois, où l'on rencontre ou rencontrera sans doute à plus ou moins long terme des problématiques agricoles similaires dans un environnement biophysique très semblable. Nos modèles TRYsim et WaTRYsim constituent un outil mobilisable pour cela, notamment du fait de leur conception informatique facilitant la préparation et l'exécution d'expérimentations virtuelles de très grande taille.

Cependant, ces « fenêtres de semis » pour la culture de printemps ne doivent pas être nécessairement utilisées directement comme des recommandations de dates de semis à l'intention des producteurs : d'autres facteurs, comme la disponibilité de la force de travail et l'opportunité de l'employer à d'autres activités économiques plus judicieuses que cette culture, doivent être pris en compte et raisonnés à l'échelle de l'exploitation.

Par ailleurs, le parti pris d'assumer des erreurs du modèle conduisant à sous-estimer plutôt qu'à surestimer les risques d'échec de la culture de printemps, ainsi que le caractère arbitraire de certains seuils utilisés dans la définition de ces « fenêtres de semis », interdisent d'affirmer qu'en dehors de ce créneau la culture est trop risquée ou qu'à l'intérieur de ce créneau la culture ne présente pas de risque. L'intérêt de ces fenêtres est que leur taille renseigne efficacement sur les variations entre types de climat, entre altitudes, entre les espèces cultivées. Dans le cas du riz, elles indiquent si l'on peut procéder au semis de plein champ ou non, elles indiquent aussi la marge de manœuvre dont disposent les producteurs pour installer cette culture de printemps en minimisant les risques. Autrement dit, elles permettent surtout de classer les climats, en tenant compte de l'altitude, du point de vue des risques spécifiques de la culture de printemps. Ces « fenêtres de semis » constituent donc plutôt une information à l'attention des agents des structures publiques de développement, pour leur permettre de mieux adapter leurs recommandations aux agriculteurs à l'extrême diversité des contraintes biophysiques qui caractérise ces milieux montagneux. En croisant cette information avec l'expérience accumulée sur les zones où le développement des cultures de printemps est déjà engagé, il devrait être possible d'étalonner progressivement les « fenêtres de semis ». Cependant, dans la modélisation, lorsque la question se posait du biais résiduel à assumer après calage, nous avons sous-estimé plutôt que surestimé les

risques d'échecs de la culture de printemps, les cas où la « fenêtre de semis » est très étroite ou inexistante devraient être considérés comme des situations où la culture de printemps n'est pas raisonnable avec les techniques de culture et les variétés considérées dans la présente thèse.

4. Perspectives pour la recherche agricole

La thèse permet d'esquisser une géographie de l'extension des cultures de printemps. Les aires de faible contrainte agroclimatique diffèrent selon les espèces cultivées, la possibilité d'irriguer ou non, et les techniques culturales.

Dans le cas du climat intermédiaire représenté par la station synoptique de Van Chan, et pour le cas où l'eau d'irrigation est abondante au printemps, la fenêtre de semis du riz irrigué repiqué devient très étroite (inférieure à 10 jours) pour des altitudes supérieures à 500m. Schématiquement, la pratique du semis direct en plein champ permet de faire gagner près de 200 m d'altitude à cette culture. Pour les cas où la hauteur de la lame d'eau ne peut pas être assez bien contrôlée pour le semis de plein champ, le recours aux serres tunnel permet d'obtenir le même résultat. Le maïs a une aire d'extension plus importante, l'altitude où la fenêtre devient inférieure à 10 jours étant de l'ordre de 700 m. Pour le soja, elle est au-delà de 1 000 m. Ces altitudes seraient à abaisser de l'ordre de 300 m pour le climat plus froid représenté par la station de Phu Ho, sauf pour le soja irrigué qui reste peu contraint pour toutes les altitudes sous ce climat, et à augmenter de 200 m pour le climat plus chaud de Mu Cang Chai.

L'amélioration variétale du riz et du maïs serait une voie pour agrandir ces aires d'extension. Elle devrait porter non seulement sur la durée du cycle mais aussi sur la température base de développement pendant la phase de croissance végétative.

En conditions pluviales, l'aire d'extension du soja est réduite de façon radicale aux très basses altitudes du fait de la sensibilité de cette culture aux stress hydriques en début de cycle. Les fenêtres favorables, sous le climat intermédiaire de Van Chan deviennent inférieures à 10 jours quand l'altitude excède 500 m et 300 m respectivement pour le riz aérobie et le maïs. Ces altitudes seraient à augmenter de 200 m pour le riz aérobie sous le climat de Mu Cang Chai, mais les contraintes pour le maïs et le soja restent inchangées. Sous le climat de Phu Ho, seules les très basses altitudes permettent d'envisager la culture pluviale de printemps avec une flexibilité d'une dizaine de jours pour la date de semis. Le riz aérobie apparaît ainsi comme une option prometteuse pour ce contexte de culture, à condition de disposer de moyens efficaces de lutte contre les adventices et de résoudre par amélioration variétale les problèmes de qualité des grains.

Une autre voie visant à établir avant semis des conditions humides dans les 20 premiers centimètres du sol de manière à garantir une levée complète en quelques jours serait intéressante à explorer pour ce contexte pluvial. Dans la mesure où les retards de levée ont une part très importante dans la réduction des fenêtres favorables au semis en conditions pluviales, et où les quantités d'eau nécessaires pour ce type d'irrigation « de semis » sont de l'ordre de 200 m³/ha, il serait approprié d'évaluer si et où les débits des cours d'eau en début de printemps permettent d'envisager une irrigation « une fois pour toute et à tour de rôle » sur certains bassins versants, sans concurrencer gravement les autres usages de l'eau ni dégrader la ressource. Cette approche serait particulièrement pertinente pour le cas du soja, dont la faible durée de cycle autorise d'échelonner les semis sur une période relativement longue si les délais de levée sont courts.

Une autre piste à explorer serait celle d'une approche agrométéorologique de la mise en place des cultures de printemps. La question serait de savoir si la prévision météorologique à 7 jours, telle qu'elle est disponible aujourd'hui, est de nature à orienter la décision de semer une culture de printemps dans le sens d'une réduction des risques d'échec. On pourrait imaginer un système d'avertissement fondé sur l'évaluation par simulation, du scénario d'un semis sous le climat prédit pour la semaine à suivre, et sous les séries historiques de données climatiques pour le reste du cycle. Cette approche basée sur les modèles que nous avons développés, pourrait être testée pour le cas des cultures irriguées comme pour celui des cultures pluviales.

De manière à mieux identifier les avantages à attendre des efforts de recherche cités dans ce qui précède, concernant l'amélioration variétale, l'élaboration de stratégies de gestion de l'eau, ou la mise au point d'un avertissement agrométéorologique, il serait utile de croiser nos résultats avec un inventaire, à réaliser, des aires de production potentielles au printemps. Cet inventaire fournirait les superficies agricoles en fonction des types de climat, des classes d'altitude, et de niveaux de la ressource en eau mobilisable pour l'irrigation. On y considérerait les cas où l'irrigation complète est possible et ceux où seul le pluvial strict est possible, mais aussi des niveaux intermédiaires, dont les cas où l'irrigation « critique » au semis est la seule option possible et ceux où une irrigation de complément est praticable à d'autres moments clefs du cycle.

Nos résultats pourraient également s'intégrer à des analyses économiques à l'échelle des exploitations agricoles, permettant de tenir compte des différences de valeur commerciale des différentes cultures et d'éventuelles contraintes de mobilisation de la force de travail au moment des fenêtres favorables de semis que nous avons identifiées. Dans de telles études, il serait justifié de mobiliser à nouveau notre modèle, après estimation des constantes thermiques du riz d'été, pour évaluer l'intérêt économique de successions des cultures de printemps et d'été lorsque cette dernière est retardée par rapport à ce qui a été considéré ici

comme la date de semis ultime au-delà de laquelle la productivité du riz d'été baisse nettement.

Enfin, à l'intérieur des fenêtres favorables que nous avons définies et estimées sur le plan agroclimatique, divers composants de l'écosystème peuvent influencer fortement les performances du système de culture à plus ou moins long terme et seront à étudier. Les conséquences de la double culture sur les pressions de ravageurs et d'adventices seront sans doute variables selon les écosystèmes et les successions envisagées. L'intensification de l'agriculture des régions montagneuses d'Asie, par le développement du double culture, aura également des conséquences importantes sur les flux de nutriments et notamment d'azote, qui méritent d'être étudiées. Dans le cas où l'irrigation est pratiquée au cours des deux saisons, l'expérience des régions de basse altitude d'Asie a montré que la durée des périodes où le sol est en condition aérobie étant très réduite, la minéralisation de la matière organique devient faible et la fertilisation minérale devient d'autant plus nécessaire. Ce phénomène sera probablement renforcé dans les régions d'altitude où les faibles températures contribuent aussi à ralentir les cinétiques de minéralisation. Ajouté au fait que les pertes d'azote minéral dans les rizières irriguées sont généralement très élevées, cela doit conduire à comparer sous l'angle des flux de ressources en azote (et en énergie associée au flux d'azote) les avantages de la stratégie du type « land sparing », actuellement retenue par les pouvoirs publics vietnamiens et dans laquelle s'inscrivait notre travail (l'effort de production est concentré sur les terres les plus favorables pour en préserver d'autres plus fragiles ou moins favorables), avec la stratégie du « land sharing » dans laquelle une exploitation raisonnée et relativement extensive des pentes serait envisagée.

Ainsi, les perspectives de recherche et de recherche-développement issues de ce travail sont nombreuses et variées. Il faudra pouvoir hiérarchiser les actions pour privilégier celles qui sont susceptibles d'avoir un impact appréciable et qui méritent d'être soutenues. La traduction géographique du présent travail doit pouvoir largement contribuer à l'élaboration de cette stratégie de recherche pour le développement.

Références

Chapitre 1 :

Affholder, F., Tiftonell, P., Corbeels, M., Roux, S., Motisi, N., Tixier, P., Wery, J., 2012. Ad Hoc Modeling in Agronomy: What Have We Learned in the Last 15 Years? *Agronomy Journal* 104, 735-748.

Andaya, V.C., Mackill, D.J., 2003. Mapping of QTLs associated with cold tolerance during the vegetative stage in rice. *Journal of Experimental Botany* 54, 2579-2585.

Bộ tài nguyên và môi trường, M.o.N.R.a.E.o.V., 2006. Sử dụng đất Việt Nam 2005 (Land use Vietnam 2005). NXB Hà Nội (Hanoi Publishing House).

Bonnin, C., Turner, S., 2011. At what price rice? Food security, livelihood vulnerability, and state interventions in upland northern Vietnam. *Geoforum* 43, 95-105.

Bouman, B.A.M., Kropff, M.J., Tuong, T.P., Wopereis, M.C.S., Berge, H.F.M.t., Laar, H.H.v., 2001. ORYZA2000: modeling lowland rice. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute.

Bouman, B.A.M., Peng, S., Castaneda, A.R., Visperas, R.M., 2005. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice, systems. *Agricultural Water Management* 74, 87-105.

Bouman, B.A.M., Yang, X.G., Wang, H.Q., Wang, Z.M., Zhao, J.F., Chen, B., 2006. Performance of aerobic rice varieties under irrigated conditions in North China. *Field Crops Research* 97, 53-65.

Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeau, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., Justes, E., 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69-92.

Casanova, D., Epema, G.F., Goudriaan, J., 1998. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. *Field Crops Research* 55, 83-92.

Castella, J.C., Quang, D., 2002. Doi Moi in the mountains: land use changes and farmers' livelihood strategies in Bac Kan Province, Viet Nam. . Agricultural Publishing House, Hanoi.

Castella, J.C., Tronche, N., Nguyen., V., 2002. Landscape changes in Cho Don District during the doi moi era (1990-2000) and their implications for sustainable natural resource management in Viet Nam's mountainous provinces. Agricultural Publishing House, Hanoi.

Dingkuhn, M., Miezan, K.M., 1995. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. 2. Validation of photothermal constants and characterization of genotypes. *Agric. Syst.* 48, 411-433.

Dingkuhn, M.B., C.; Bonnal, V.; Maraux, F.; Sarr, B.; Sultan, B.; Clopes, A.; Forest, F. , 2003. Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. In: Struif Bontkes, T.E.W., M. C. S. (Ed.), *Decision support tools for smallholder agriculture in Sub-Saharan Africa: a practical guide.* , pp. 127-139

Doan Van Diem, Hanh., T.D., Vinh., L.Q., Binh, N.T., 2008. Giáo trình Khí tượng Nông nghiệp (Agricultural Meteorology Curriculum). Truong Dai hoc Nong nghiep I, Ha Noi.

General stastitics office, T.c.t.k., 2010. Số liệu thống kê (Stastices databases).

Janowiak, F., Luck, E., Dorffling, K., 2003. Chilling tolerance of maize seedlings in the field during cold periods in spring is related to chilling-induced increase in abscisic acid level. *J. Agron. Crop Sci.* 189, 156-161.

Katsura, K., Maeda, S., Lubis, I., Horie, T., Cao, W., Shiraiwa, T., 2008. The high yield of irrigated rice in Yunnan, China: A cross-location analysis. *Field Crops Research* 107, 1-11.

Katsura, K., Okami, M., Mizunuma, H., Kato, Y., 2010. Radiation use efficiency, N accumulation and biomass production of high-yielding rice in aerobic culture. *Field Crops Research* 117, 81-89.

Le Quoc Doanh, Luu Ngoc Quyen, 2007. Nghiên cứu áp dụng các biện pháp kỹ thuật nâng cao hiệu quả sử dụng đất ruộng một vụ vùng miền núi phía bắc Việt Nam (Study on application of technical approached to increasing efficiency of use rice field cropped one a year in the moutainous region of the north Viet Nam). *Science and technology journal of agriculturure and rural development.* 7, 79-82.

Le Quoc Doanh, Nguyen Van Bo, Tuan, H.D., 2003. Upland agricultural development: current status and orientation. Agriculture Publishing house, Vietnam.

Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B., 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources.* Annual Reviews, Palo Alto, pp. 179-204.

Musy, P.A., 2005. Hydrologie Générale. Section SIE et GC. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (ISTE/HYDRAM). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

Nguyen, B.T., Pryor, T.L., 1997. The relationship between global solar radiation and sunshine duration in Vietnam. *Renewable Energy* 11, 47-60.

Nguyen Thanh Son, 2005. Đánh giá tài nguyên nước Việt Nam. (Vietnam Natural resources estimation, land water resources). Nhà xuất bản đại học quốc gia Hà Nội (Hanoi University Publishing House).

Pandey, S., Khiem, N.T., Waibel, H., Thien, T.C., 2006. Upland rice household food security, and commercialization of upland agriculture in Vietnam. *IRRI Vol. 2*, 106 p.

Rezaul, M., 1997. Impacts of air temperature variations on the boro rice phenology in Bangladesh: implications for irrigation requirements. *Agric. For. Meteorol.* 84, 233-247.

Schleppi, P., Soldati, A., Keller, E.R., 1990. Photosynthate Partitioning in Flowering Soybeans Subjected to a Cold Stress. *Journal of Plant Physiology* 136, 556-563.

SFRI, V.T.N.N.H., 1998. So tay phan tich dat, nuoc, phan bon va cay trong (Handbook for Soil, Water, Fertilizer and Plant Analysis). NXB Nong nghiep Hanoi (Hanoi Agricultural Publishing House).

Sinclair, T.R., Seligman, N.G., 1996. Crop modeling: From infancy to maturity. *Agronomy Journal* 88, 698-704.

Singer, J.W., Meek, D.W., Sauer, T.J., Prueger, J.H., Hatfield, J.L., 2010. Variability of light interception and radiation use efficiency in maize and soybean. *Field Crops Research* 121, 147-152.

Smith, M., Food and Agriculture Organization of the United, N., 1993. CLIMWAT for CROPWAT : a climatic database for irrigation planning and management. FAO, Rome.

The World Bank, 2012. World DataBank.

Tran Duc Vien, 2003. Culture, environment, and farming systems in Vietnam's Northern Mountain Region. *Southeast Asian Studies* 41, 180-205.

VAAS, V.A.o.A.S.-. 2011. Toạ đàm kỹ thuật chăm sóc lúa xuân sau rét để đạt năng suất cao và giải pháp cho vụ mùa tại miền Bắc (Technical Seminar take care for spring rice after the cold to achieve high productivity and solutions for the summer crop in the North).

Wang, Z., Reddy, V.R., Quebedeaux, B., 1997. Growth and photosynthetic responses of soybean to short-term cold temperature. *Environ. Exp. Bot.* 37, 13-24.

Chapitre 2 :

Affholder, F., Tittone, P., Corbeels, M., Roux, S., Motisi, N., Tixier, P., Wery, J., 2012. Ad Hoc Modeling in Agronomy: What Have We Learned in the Last 15 Years? *Agronomy Journal* 104, 735-748.

Alocilja, E., C. and J.T., Ritchie., 1991. A model for the phenology of rice. In: In Hodges, T.e. (Ed.), *Predicting Crop Phenology*. Boca Raton, Florida, CRC Press

Andaya, V.C., Mackill, D.J., 2003. Mapping of QTLs associated with cold tolerance during the vegetative stage in rice. *Journal of Experimental Botany* 54, 2579-2585.

Baker, F.S., 1944. Mountain climates of the western United States. *Ecological Monographs*, pp. 223-254.

Birch, C.J., Hammer, G.L., Rickert, K.G., 1998. Temperature and photoperiod sensitivity of development in five cultivars of maize (*Zea mays* L.) from emergence to tassel initiation. *Field Crops Research* 55, 93-107.

Bouman, B.A.M., Kropff, M.J., Tuong, T.P., Wopereis, M.C.S., Berge, H.F.M.t., Laar, H.H.v., 2001. *ORYZA2000: modeling lowland rice*. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute.

Bouman, B.A.M., Peng, S., Castaneda, A.R., Visperas, R.M., 2005. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice, systems. *Agricultural Water Management* 74, 87-105.

Bouman, B.A.M., Yang, X.G., Wang, H.Q., Wang, Z.M., Zhao, J.F., Chen, B., 2006. Performance of aerobic rice varieties under irrigated conditions in North China. *Field Crops Research* 97, 53-65.

Brisson, N., Bona, S., Bouniols, A., 1989. A soybean crop simulation - model - validation and adaptation to varieties cultivated in Southern europe. *Agronomie* 9, 27-36.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2001. An overview of the crop model STICS. 2nd International Symposium on Modeling Cropping Systems, Florence, Italy, pp. 309-332.

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., Delecolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.

- Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeau, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., Justes, E., 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69-92.
- Confalonieri, R., Acutis, M., Bellocchi, G., Donatelli, M., 2009. Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. *Ecol. Model.* 220, 1395-1410.
- Dat Van, T., 1997. World rice production: main issues and technical possibilities. *Cahiers Options Méditerranéennes* 24, 57-69.
- Dingkuhn, M., 1995. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. 3. Characterizing environments by simulating crop phenology. *Agric. Syst.* 48, 435-456.
- Feng, D.Y., Fu, L.Q., 1989. Main meteorological problems of production and protective measures in China. *Int. J. Biometeorol.* 33, 1-6.
- Fukai, S., 1999. Phenology in rainfed lowland rice. *Field Crops Research* 64, 51-60.
- Gao, L., Jin, Z., Huang, Y., Zhang, L., 1992. Rice clock model - a computer model to simulate rice development. *Agric. For. Meteorol.* 60, 1-16.
- Horie, T., Sakuratani, T., 1985. Studies on Crop-Weather Relationship Model in Rice. (1) Relation between Absorbed Solar Radiation by the Crop and the Dry Matter Production. *Journal of Agricultural Meteorology* 40, 331-342.
- Hungria, M., Chueire, L.M.D., Coca, R.G., Megias, M., 2001. Preliminary characterization of fast growing rhizobial strains isolated from soyabean nodules in Brazil. *Soil Biol. Biochem.* 33, 1349-1361.
- Idinoba, M.E., Idinoba, P.A., Gbadegesin, A.S., 2002. Radiation interception and its efficiency for dry matter production in three crop species in the transitional humid zone of Nigeria. *Agronomie* 22, 273-281.
- Janowiak, F., Luck, E., Dorffling, K., 2003. Chilling tolerance of maize seedlings in the field during cold periods in spring is related to chilling-induced increase in abscisic acid level. *J. Agron. Crop Sci.* 189, 156-161.
- Kouressy, M., Dingkuhn, M., Vaksman, M., Heinemann, A.B., 2008. Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agric. For. Meteorol.* 148, 357-371.
- Le Quoc Doanh, Luu Ngoc Quyen, 2007. Nghiên cứu áp dụng các biện pháp kỹ thuật nâng cao hiệu quả sử dụng đất ruộng một vụ vùng miền núi phía bắc Việt Nam (Study on application of technical approach to increasing efficiency of use rice field cropped one a year in the mountainous region of the north Viet Nam). *Science and technology journal of agriculture and rural development.* 7, 79-82.
- Linquist, B., Trosch, K., Pandey, S., Phouinyavong, K., Guenat, D., 2007. Montane Paddy Rice: Development and Effects on Food Security and Livelihood Activities of Highland Lao Farmers. *Mountain Research and Development* 27, 40-47.
- Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B., 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources.* Annual Reviews, Palo Alto, pp. 179-204.

Lou, Q.J., Chen, L., Sun, Z.X., Xing, Y.Z., Li, J., Xu, X.Y., Mei, H.W., Luo, L.J., 2007. A major QTL associated with cold tolerance at seedling stage in rice (*Oryza sativa* L.). *Euphytica* 158, 87-94.

Rezaul, M., 1997. Impacts of air temperature variations on the boro rice phenology in Bangladesh: implications for irrigation requirements. *Agric. For. Meteorol.* 84, 233-247.

Schleppi, P., Soldati, A., Keller, E.R., 1990. Photosynthate Partitioning in Flowering Soybeans Subjected to a Cold Stress. *Journal of Plant Physiology* 136, 556-563.

Setiyono, T.D., Weiss, A., Specht, J., Bastidas, A.M., Cassman, K.G., Dobermann, A., 2007. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research* 100, 257-271.

Shimono, H., Hasegawa, T., Iwama, K., 2002. Response of growth and grain yield in paddy rice to cool water at different growth stages. *Field Crops Research* 73, 67-79.

Sinclair, T.R., Seligman, N.G., 1996. Crop modeling: From infancy to maturity. *Agronomy Journal* 88, 698-704.

Singer, J.W., Meek, D.W., Sauer, T.J., Prueger, J.H., Hatfield, J.L., 2010. Variability of light interception and radiation use efficiency in maize and soybean. *Field Crops Research* 121, 147-152.

Sipaseuth, Basnayake, J., Fukai, S., Farrell, T.C., Senthonghae, M., Sengkeo, Phamixay, S., Linquist, B., Chanphengsay, M., 2007. Opportunities to increasing dry season rice productivity in low temperature affected areas. *Field Crops Research* 102, 87-97.

Wang, Z., Reddy, V.R., Quebedeaux, B., 1997. Growth and photosynthetic responses of soybean to short-term cold temperature. *Environ. Exp. Bot.* 37, 13-24.

Chapitre 3 :

Affholder, F., 1995. Effect of organic-matter input on the water-balance and yield of millet under tropical dryland condition. *Field Crops Research* 41, 109-121.

Affholder, F., 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research* 52, 79-93.

Affholder, F., Assad, E.D., Bonnal, P., Macena da Silva, F.A., Forest, F., Madeira Netto, J., Scopel, E., Corbeels, M., 2006. Risques de stress hydrique dans les Cerrados Brésiliens. Du zonage régional à l'analyse des risques à l'échelle des exploitations familiales. *Cahiers Agricultures* 15, 433-439.

Affholder, F., Rodrigues, G.C., Assad, E.D., 1997. Modelo agroclimático para avaliação do comportamento do milho na região dos cerrados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília 32, p.993-1002.

Affholder, F., Titttonell, P., Corbeels, M., Roux, S., Motisi, N., Tixier, P., Wery, J., 2012. Ad Hoc Modeling in Agronomy: What Have We Learned in the Last 15 Years? *Agronomy Journal* 104, 735-748.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO Irrigation and Drainage Paper, xxvi + 300 pp.

Boote, K.J., Kropff, M.J., Bindraban, P.S., 2001. Physiology and modelling of traits in crop plants: implications for genetic improvement. *Agric. Syst.* 70, 395-420.

Bouman, B.A.M., Peng, S., Castaneda, A.R., Visperas, R.M., 2005. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice, systems. *Agricultural Water Management* 74, 87-105.

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., Delecolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.

Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeau, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., Justes, E., 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69-92.

Calonego, J.C., Rosolem, C.A., 2010. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. *European Journal of Agronomy* 33, 242-249.

Chen, G.H., Weil, R.R., 2011. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil & Tillage Research* 117, 17-27.

Coelho, M.B., Mateos, L., Villalobos, F.J., 2000. Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in Southern Spain. *Soil & Tillage Research* 57, 129-142.

Doan Van Diem, Hanh., T.D., Vinh., L.Q., Binh, N.T., 2008. Giáo trình Khí tượng Nông nghiệp (Agricultural Meteorology Curriculum). Trường Đại học Nông nghiệp I, Hà Nội.

Fernandez, F.G., Brouder, S.M., Volenec, J.J., Beyrouty, C.A., Hoyum, R., 2011. Soybean shoot and root response to localized water and potassium in a split-pot study. *Plant Soil* 344, 197-212.

Forest, F., Clopes, A., 1994. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. F.N. Reyniers, L. Netoyo (Eds.), *Bilan Hydrique Agricole et Sécheresse en Afrique Tropicale. Vers une gestion des flux hydriques par les systèmes de culture?* Actes Sem. Int., Bamako, Mali. J. Libbey, Paris (1994), pp. 3-15.

Garcia-Huidobro, J., Monteith, J.L., Squire, G.R., 1982. Time, Temperature and Germination of Pearl Millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.). *Journal of Experimental Botany* 33, 288-296.

Ge, T.D., Sui, F.G., Bai, L.P., Tong, C.L., Sun, N.B., 2011. Effects of water stress on growth, biomass partitioning, and water-use efficiency in summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. *Acta Physiol. Plant.* 34, 1043-1053.

- Gombos, B., Simon-Kiss, I., 2008. Study and modelling the emergence of five Hungarian rice cultivars. *Cereal Res. Commun.* 36, 501-510.
- Helms, T.C., Deckard, E.L., Goos, R.J., Enz, J.W., 1996. Soil moisture, temperature, and drying influence on soybean emergence. *Agronomy Journal* 88, 662-667.
- Irmak, A., Jones, J.W., Jagtap, S.S., 2005. Evaluation of the CROPGRO-soybean model for assessing climate impacts on regional soybean yields. *Transactions of the Asae* 48, 2343-2353.
- Itabari, J.K., Gregory, P.J., Jones, R.K., 1993. Effects of temperature, soil - water status and depth of planting on germination and emergence of maize (*Zea mays*) adapted to semiarid Eastern Kenya. *Experimental Agriculture* 29, 351-364.
- Jego, G., Pattey, E., Bourgeois, G., Drury, C.F., Tremblay, N., 2011. Evaluation of the STICS crop growth model with maize cultivar parameters calibrated for Eastern Canada. *Agronomy for Sustainable Development* 31, 557-570.
- Laboski, C.A.M., Dowdy, R.H., Allmaras, R.R., Lamb, J.A., 1998. Soil strength and water content influences on corn root distribution in a sandy soil. *Plant Soil* 203, 239-247.
- Le Quoc Doanh, Luu Ngoc Quyen, 2007. Nghiên cứu áp dụng các biện pháp kỹ thuật nâng cao hiệu quả sử dụng đất ruộng một vụ vùng miền núi phía bắc Việt Nam (Study on application of technical approched to increasing efficiency of use rice field cropped one a year in the moutainous region of the north Viet Nam). *Science and technology journal of agriculturure and rural development.* 7, 79-82.
- Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B., 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources.* Annual Reviews, Palo Alto, pp. 179-204.
- Merrill, S.D., Tanaka, D.L., Hanson, J.D., 2002. Root Length Growth Of Eight Crop Species In Haplustoll Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 913-923.
- Mulugeta Seyoum, Sentayehu Alamerew, Bantte, K., 2011. Evaluation of Upland NERICA Rice (*Oryza sativa* L.) Genotypes for Grain Yield and Yield Components along an Altitude Gradient in Southwest Ethiopia. *Journal of Agronomy* 10, 105-111.
- Nguyen Thanh Son, 2005. Đánh giá tài nguyên nước Việt Nam. (Vietnam Natural resources estimation, land water resources). Nhà xuất bản đại học quốc gia Hà Nội (Hanoi University Publishing House).
- Nicoullaud, B., Darthout, R., Odile, D., 1995. Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols agrilo-limoneux de Petite Beauce. *Etude et Gestion des sols* 2 (3), 183-200.
- NISF, V.T.N.N.H.-. 1998. So tay phan tich dat, nuoc, phan bon va cay trong. *Handbook for Soil, Water, Fertilizer and Plant Analysis.* NXB Nong nghiep Hanoi. *Hanoi Agricultural Publishing House.*
- Norsworthy, J.K., Oliveira, M.J., 2007. A model for predicting common cocklebur (*Xanthium strumarium*) emergence in soybean. *Weed Sci.* 55, 341-345.

Price, A.H., Steele, K.A., Moore, B.J., Jones, R.G.W., 2002. Upland rice grown in soil-filled chambers and exposed to contrasting water-deficit regimes: II. Mapping quantitative trait loci for root morphology and distribution. *Field Crops Research* 76, 25-43.

Qi, A., Wheeler, T.R., Keatinge, J.D.H., Ellis, R.H., Summerfield, R.J., Craufurd, P.Q., 1999. Modelling the effects of temperature on the rates of seedling emergence and leaf appearance in legume cover crops. *Experimental Agriculture* 35, 327-344.

Rahmianna, A.A., Adisarwanto, T., Kirchhof, G., So, H.B., 2000. Crop establishment of legumes in rainfed lowland rice-based cropping systems. *Soil & Tillage Research* 56, 67-82.

Rinaldi, M., Di Paolo, E., Richter, G.M., Payne, R.W., 2005. Modelling the effect of soil moisture on germination and emergence of wheat and sugar beet with the minimum number of parameters. *Annals of Applied Biology* 147, 69-80.

Scopel, E., Da Silva, F.A.M., Corbeels, M., Affholder, F.O., Maraux, F., 2004. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. *Agronomie* 24, 383-395.

Sharma, P., Shukla, M.K., Sammis, T.W., 2010. Predicting soil temperature using air temperature and soil, crop, and meteorological parameters for three specialty crops in Southern New Mexico. *Appl. Eng. Agric.* 26, 47-58.

Tyagi, S.K., Tripathi, R.P., 1983. Effect of temperature on soybean germination. *Plant Soil* 74, 273-280.

Vankeulen, H., 1981. Simulation of water-use and herbage growth in arid regions - A re-evaluation and further development of the model arid crop. *Agric. Syst.* 6, 159-193.

Chapitre 4 :

Bussi re, F., Cellier, P., 1993. Interception de la pluie par un mulch de feuilles de canne   sucre (*Saccharum officinarum*): utilisation d'un dispositif de mesure automatis  pour le test d'un modèle. *Agronomie* 13, 35-43.

Easson, D.L., Fearnough, W., 2000. Effects of plastic mulch, sowing date and cultivar on the yield and maturity of forage maize grown under marginal climatic conditions in Northern Ireland. *Grass Forage Sci.* 55, 221-231.

Easson, D.L., Fearnough, W., 2003. The ability of the Ontario heat unit system to model the growth and development of forage maize sown under plastic mulch. *Grass Forage Sci.* 58, 372-384.

Ghosh, P.K., Dayal, D., Bandyopadhyay, K.K., Mohanty, K., 2006. Evaluation of straw and polythene mulch for enhancing productivity of irrigated summer groundnut. *Field Crops Research* 99, 76-86.

Jourdain, D., Rakotofiringa, A., Quang, D.D., Valony, M.J., Vidal, R., Jamin, J.Y., 2011. Irrigation water management in the Northern Mountains of Vietnam: Towards more autonomy? *Cahiers Agricultures* 20, 78-84.

Linguist, B., Trosch, K., Pandey, S., Phouynyavong, K., Guenat, D., 2007. Montane Paddy Rice: Development and Effects on Food Security and Livelihood Activities of Highland Lao Farmers. *Mountain Research and Development* 27, 40-47.

Nguyen Duy Can, Xuan, V., 2000. Environmental conditions as determinants of direct seeding techniques in different ecosystems in the Mekong Delta of Vietnam. *Proceedings of the International Workshop on Direct Seeding in Asian Rice Systems: Strategic Research Issues and Opportunities*. IRRI, Asian.

Price, J., Rochefort, L., Quinty, F., 1998. Energy and moisture considerations on cutover peatlands: surface microtopography, mulch cover and *Sphagnum* regeneration. *Ecol. Eng.* 10, 293-312.

Ramakrishna, A., Tam, H.M., Wani, S.P., Long, T.D., 2006. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam. *Field Crops Research* 95, 115-125.

Scopel, E., Da Silva, F.A.M., Corbeels, M., Affholder, F.O., Maraux, F., 2004. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. *Agronomie* 24, 383-395.

Stevoux, V., 2000. Caractérisation de l'enherbement des systèmes de culture traditionnels de maïs et de riz pluvial dans une zone montagnarde du nord Viet Nam, village de Ban Cuon, district de Cho Don, Province de Bac Kan. CNEARC ESAT (Montpellier, FRA) ; CIRAD CA (Montpellier, FRA) ; VASI (VNM). CNEARC ESAT (Montpellier, FRA), Montpellier.

ANNEXES

Annexe 1. Plan du dispositif

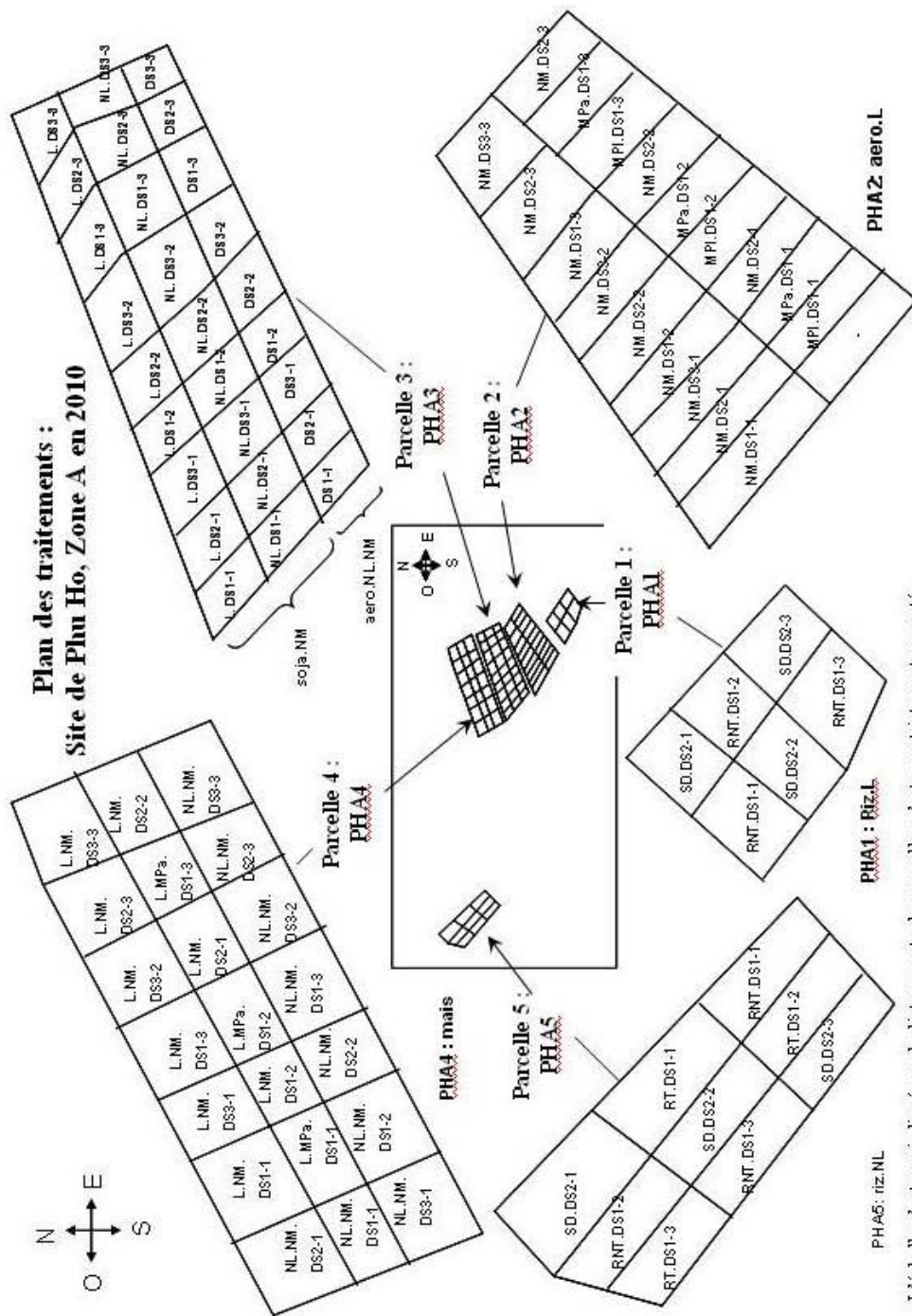
Annexe 2. Méthodes de mesure et d'échantillonnage sur le terrain

Annexe 3. Structure de la base de données

Annexe 4. Données observées sur le dispositif

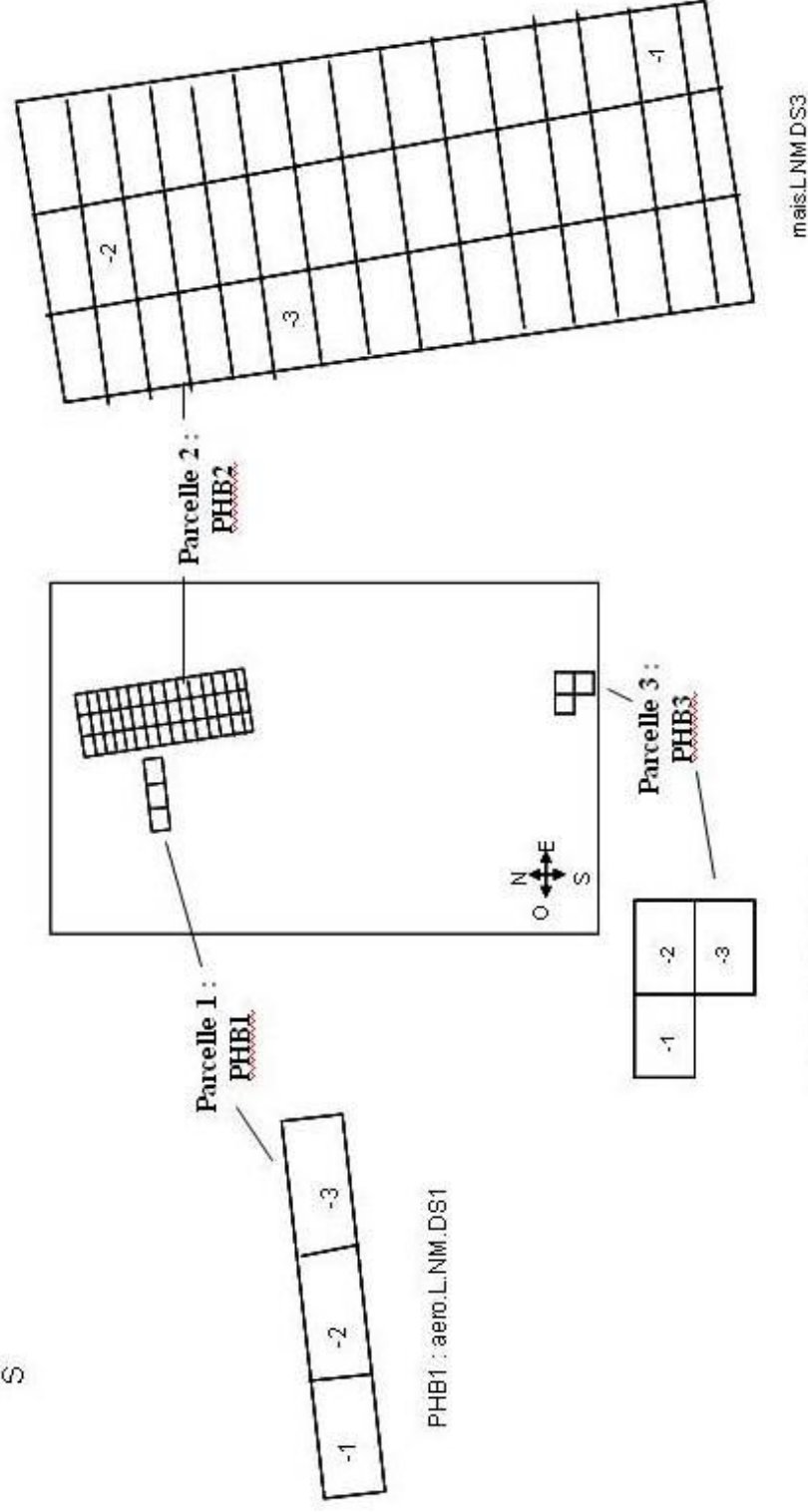
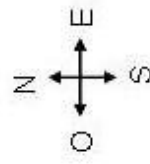
Annexe 5. Résultats d'expérimentation virtuelle

Annexe 1. Plan du dispositif



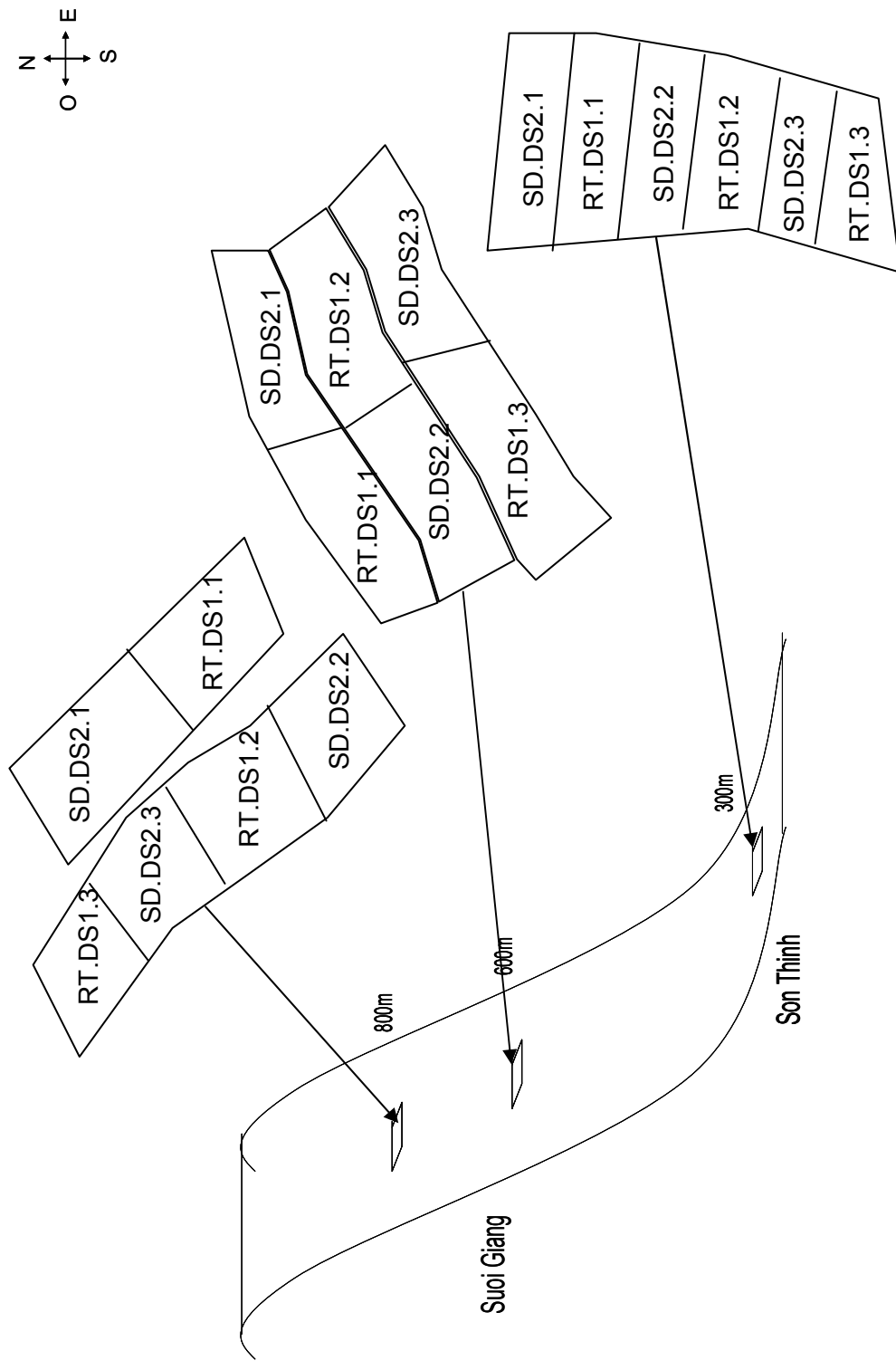
L'échelle n'est pas indiquée car la distance entre les parcelles n'est pas strictement respectée.

Plan des traitements : Site de Phu Ho, Zone B En 2010



L'échelle n'est pas indiquée car la distance entre les parcelles ni la surface des parcelles ne sont strictement respectées.

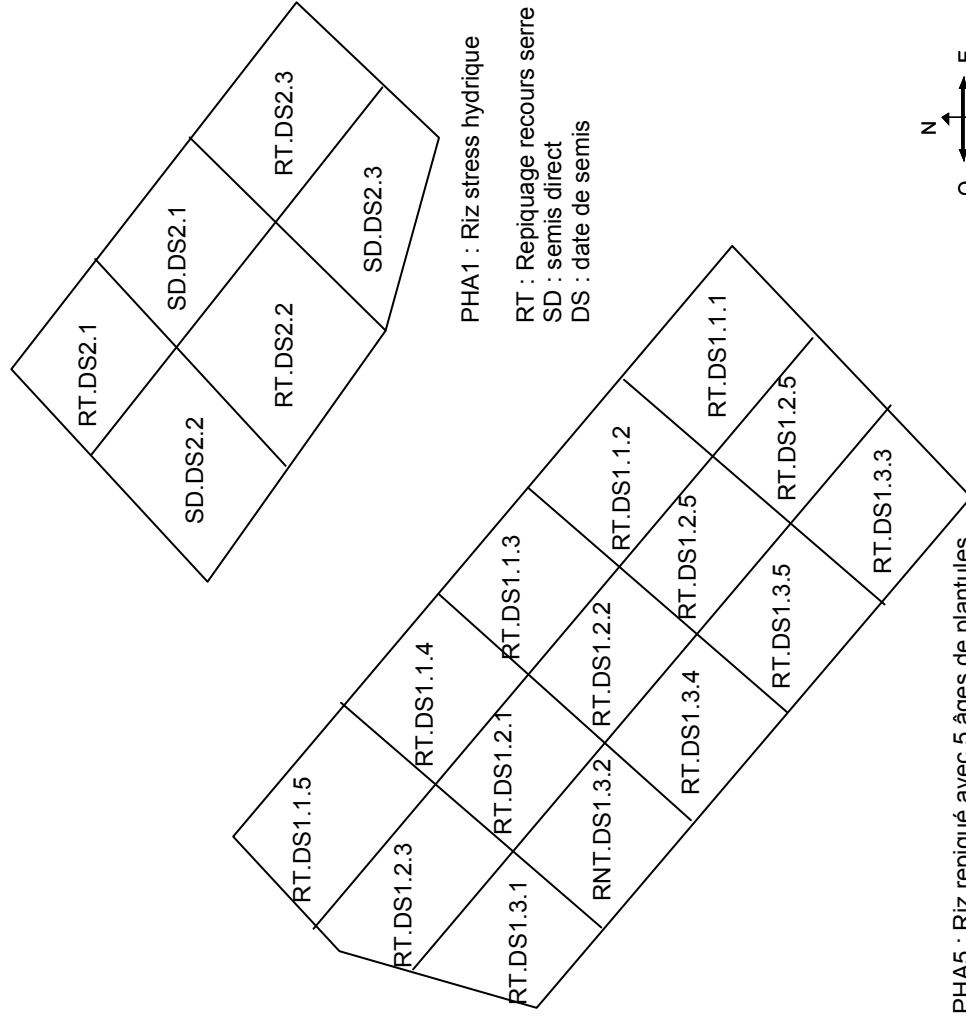
Plan des traitements sur le riz irrigué
site de Suoi Giang en 2010



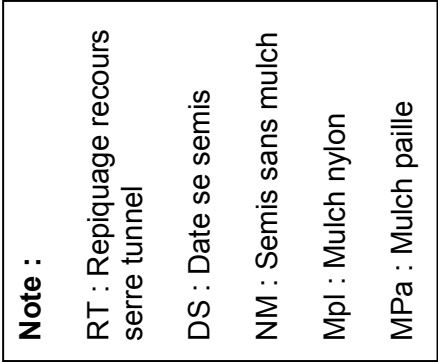
Plan des traitements sur le riz irrigué site de Phu Ho en 2011

| | | | |
|---------|--------------|-------------|-------------|
| Maïs | MpPa.DS2.1.3 | Mpl.DS2.1.3 | NM.DS2.1.3 |
| | Mpl.DS2.1.2 | NM.DS2.1.2 | MPa.DS2.1.2 |
| | NM.DS2.1.1 | MPa.DS2.1.1 | Mpl.DS2.1.1 |
| | NM.DS3.1.1 | NM.DS3.1.2 | NM.DS3.1.3 |
| | NM.DS3.1.1 | NM.DS3.1.2 | NM.DS3.1.3 |
| | NM.DS3.1.1 | NM.DS3.1.2 | NM.DS3.1.3 |
| | NM.DS2.1.1 | NM.DS2.1.2 | NM.DS2.1.3 |
| | NM.DS2.1.1 | NM.DS2.1.2 | NM.DS2.1.3 |
| Riz | | | |
| Aérobic | | | |
| Soja | | | |

PHB4 : Essai sur les cultures
pluviales sous stress hydrique



site de Suoi Giang 800m en 2011





Essais à Phu Ho zone A dans la condition potentielle de l'eau en 2010



Essais à Suoi Giang 800m dans la condition non suffisante de l'eau en 2011

Annexe 2. Méthodes de mesure et d'échantillonnage sur le terrain

2.1. LAI

20 à 25 jours après semis, pour chaque placette, une sous-placette a été définie pour chaque placette pour effectuer les mesures de LAI afin d'avoir une densité homogène et représentative de la parcelle. Les sous-placettes étaient d'environ 2 à 5 m² selon leur situation. Les mesures ont été effectuées avec le Licor 2000 tous les 12-15 jours à Phu Ho, et tous les 15-20 jours à Suoi Giang.

2.2. Echantillonnage de biomasse et rendement en grain

Pour la mesure de biomasse aérienne avant récolte, à chaque mesure, un échantillon a été prélevé sur 5 plantes coupées au hasard (hors de l'endroit de mesure du LAI), puis séché dans une étuve à 80 °C pendant 48 h. La biomasse totale a été calculée à partir de la biomasse moyenne des 5 plantes, multipliée par la densité mesurée à la récolte.

La biomasse aérienne à la récolte a été mesurée par un échantillon pris sur 1 m² pour le riz irrigué et aérobie, et sur 3 m² pour le soja et le maïs. L'échantillon a été prélevé à l'endroit pour mesurer le LAI. Cet échantillon a été séché dans une étuve pendant 48h à 80 °C et pesé. Il comprend deux parties différentes : biomasse de paille et biomasse en grains.

2.3. Echantillonnage des composantes du rendement

A partir de l'échantillon récolté pour mesurer la biomasse, la densité des plantes a été mesurée. Ensuite, 5 plantes ont été choisies au hasard et les composantes du rendement ont été mesurées : nombre d'épis (ou gousse) par plante, nombre de grains par épis (ou gousse), et poids de 1000 grains secs (séchés dans l'étuve pendant 48h à 80°C). La moyenne des valeurs obtenues sur les 5 plants a été calculée. Ces données ont permis de calculer le nombre de grains par plante et par m².

2.4. Mesure l'humidité pondérale

Matériel :

Au champ : une tarière, des boîtes de poids connu.

Au laboratoire : une balance électrique de précision, une étuve.

Déroulement :

Pour chaque prélèvement à la parcelle, la proposition a choisi au milieu pour mesure LAI. Où, un prélèvement de sol a été effectué à la tarière tous les 20 cm jusqu'à 1 m de profondeur tous les 15 jours jusqu'à la phase remplissage du grain. Pour chaque intervalle de profondeur, le sol prélevé a été mélangé pour obtenir un échantillon homogène, représentatif de l'humidité dans cette tranche. Les échantillons étaient conservés dans des boîtes soigneusement fermées. Au laboratoire, les échantillons étaient pesés dans leur boîte, puis placés à l'étuve pour séchage à 105 °C pendant 48 h. Les échantillons étaient ensuite pesés après le séchage. L'humidité pondérale du sol (g d'eau/gsol, W_s) a été calculée par l'équation suivante :

$$W_s = ((P_f - P_b) - (P_s - P_b)) / (P_s - P_b)$$

P_f : Poids frais de l'échantillon; P_s : Poids sec de l'échantillon, P_b : Poids de la boîte.

2.5. Détermination de l'humidité du sol au point de flétrissement permanent :

La mesure d'humidité du sol au point de flétrissement a été faite par gravimétrie quand les plants étaient flétris au point de ne pas se redresser. A chaque site, elle a été estimée en utilisant la valeur la plus faible de la teneur en eau du sol au cours de l'ensemble de la période de mesure.

2.6. Détermination de l'humidité à la capacité au champ (g d'eau/g sol) par la méthode conventionnelle du double anneau de Klimet Smith (SFRI, 1998):

Matériel :

Au champ : Les deux anneaux en fer (diamètre anneau externe : 15 cm ; diamètre anneau interne : 12 cm ; hauteur de deux anneaux : 25 cm), des boîtes de poids connu.

Au laboratoire : une balance de précision, une étuve.

Déroulement :

Les deux anneaux sont placés à 5 cm de profondeur dans le sol. De l'eau était introduite dans les deux anneaux (sans déborder de l'anneau). Quand l'eau a infiltré, de l'eau a de nouveau été versée dans les deux anneaux. L'opération a été répétée pendant environ 3 heures, jusqu'à ce que l'eau n'infiltré plus (de l'eau était introduite 9 ou 10 fois). De l'eau a été ajoutée une dernière

fois jusqu'à la surface des deux anneaux pour saturer le sol. Après 24 h, nous avons prélevé le sol à la tarière (de 0 à 1 m de profondeur) et mesuré l'humidité du sol. Les échantillons ont été traités comme pour la mesure d'humidité pondérale. Pour chaque site, nous avons effectué deux répétitions distantes de 100 m.



2.7. Détermination de la densité apparente

Matériel :

Au champ : Cylindres standards de 100 cm³, capuchons fournis avec les cylindres, pièce intermédiaire permettant d'enfoncer les cylindres sans les abîmer, masse, couteau pour sol, mètre.

Au laboratoire : une balance de précision, une étuve, des coupelles ou boîtes de poids connu, passant à l'étuve.

Déroulement :

Un profil de sol a été réalisé jusqu'à 1m de profondeur, pour ensuite effectuer les prélèvements nécessaires à la détermination de la densité apparente. Le profil de sol révèle des horizons de structures, textures, potentiellement différentes. Il est alors intéressant de mesurer la densité apparente pour chacun de ces horizons.

A chaque profondeur (0 – 5 cm, et tous les 10 cm de 0 à 100 cm), on positionne le cylindre perpendiculairement au profil, de façon à pouvoir l'enfoncer horizontalement à l'aide d'une masse. Afin de ne pas abîmer le cylindre, on utilise une pièce métallique intermédiaire,

qui sert par la suite à retirer le cylindre du sol. Lors de l'enfoncement du cylindre, il faut prendre garde de ne pas tasser le sol, ce qui modifierait la densité apparente. Le cylindre est alors retiré soigneusement du sol, de façon à être rempli à ras bord de sol.

L'extraction du volume le plus précisément possible est l'étape délicate de cette mesure. S'il manque un fragment de sol pour remplir le volume du cylindre, il ne sert à rien de rajouter du sol par-dessus et de tasser, il faut simplement recommencer le prélèvement. Le sol dépassant du cylindre doit être éliminé avec le plat de la lame du couteau afin d'arriver exactement à ras-bord du cylindre. Le cylindre est alors fermé à l'aide de deux capuchons et ramené au laboratoire.

Au laboratoire, chaque cylindre est vidé soigneusement de la terre dans une coupelle de poids connu m_c . Les coupelles sont placées à l'étuve à 105°C pendant 24 heures, puis sont pesées. Soit m_{tot} la masse de sol sec dans la coupelle, on accède alors à la densité apparente sèche : $d = m_{\text{sol séché}} / 100 \text{ (g sol/cm}^3\text{)}$



Annexe 4. Données observées sur le dispositif

4.1. LAI

| Annee | ldzone | codtrait_zone | jdat | LAI_obs | Ecart | Annee | ldzone | codtrait_zone | jdat | LAI_obs | Ecart |
|-------|--------|---------------|------|---------|-------|-------|--------|---------------|------|---------|-------|
| 2010 | 1-1 | 1-1_11420 | 69 | 2.34 | 1.08 | 2010 | 1-1 | 1-1_21230 | 107 | 0.55 | 0.12 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_11420 | 82 | 2.65 | 0.71 | 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 69 | 0.41 | 0.11 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_11420 | 96 | 3.54 | 0.69 | 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 82 | 0.62 | 0.19 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_11420 | 107 | 4.60 | 0.81 | 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 107 | 2.19 | 0.21 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_11610 | 69 | 0.64 | 0.14 | 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 120 | 3.98 | 0.98 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_11610 | 82 | 1.46 | 0.41 | 2010 | 1-1 | 1-1_22210 | 69 | 0.90 | 0.55 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_11610 | 96 | 3.06 | 0.58 | 2010 | 1-1 | 1-1_22210 | 82 | 0.97 | 0.06 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_11610 | 107 | 4.17 | 0.15 | 2010 | 1-1 | 1-1_22210 | 107 | 2.35 | 0.16 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12420 | 69 | 1.68 | 0.54 | 2010 | 1-1 | 1-1_22210 | 120 | 3.18 | 1.01 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12420 | 82 | 2.30 | 0.17 | 2010 | 1-1 | 1-1_22220 | 69 | 0.69 | 0.16 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12420 | 97 | 4.27 | 1.00 | 2010 | 1-1 | 1-1_22220 | 82 | 0.55 | 0.26 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12420 | 108 | 3.80 | 0.19 | 2010 | 1-1 | 1-1_22220 | 107 | 1.91 | 0.41 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12420 | 119 | 4.75 | 0.99 | 2010 | 1-1 | 1-1_22220 | 120 | 2.72 | 0.36 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12510 | 69 | 0.76 | 0.10 | 2010 | 1-1 | 1-1_22230 | 69 | 0.30 | 0.13 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12510 | 82 | 1.72 | 0.16 | 2010 | 1-1 | 1-1_22230 | 82 | 0.15 | 0.06 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12510 | 97 | 3.53 | 1.14 | 2010 | 1-1 | 1-1_22230 | 107 | 1.19 | 0.46 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12510 | 108 | 4.35 | 0.28 | 2010 | 1-1 | 1-1_22230 | 120 | 2.00 | 1.44 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12510 | 119 | 4.32 | 0.75 | 2010 | 1-1 | 1-1_31210 | 69 | 1.29 | 0.33 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12610 | 69 | 0.82 | 0.42 | 2010 | 1-1 | 1-1_31210 | 82 | 3.43 | 0.29 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12610 | 82 | 1.81 | 0.46 | 2010 | 1-1 | 1-1_31210 | 107 | 3.33 | 0.36 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12610 | 97 | 3.03 | 0.54 | 2010 | 1-1 | 1-1_31220 | 69 | 1.80 | 0.18 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12610 | 108 | 3.80 | 0.51 | 2010 | 1-1 | 1-1_31220 | 82 | 3.42 | 1.16 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12610 | 119 | 4.08 | 1.02 | 2010 | 1-1 | 1-1_31220 | 107 | 3.65 | 0.22 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 69 | 0.13 | 0.03 | 2010 | 1-1 | 1-1_31230 | 69 | 1.11 | 0.27 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 82 | 0.55 | 0.16 | 2010 | 1-1 | 1-1_31230 | 82 | 1.99 | 0.34 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 107 | 1.15 | 0.34 | 2010 | 1-1 | 1-1_31230 | 107 | 3.99 | 0.71 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 120 | 2.61 | 0.61 | 2010 | 1-1 | 1-1_32210 | 69 | 2.07 | 0.31 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 69 | 0.30 | 0.11 | 2010 | 1-1 | 1-1_32210 | 82 | 2.81 | 0.60 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 82 | 0.52 | 0.24 | 2010 | 1-1 | 1-1_32210 | 96 | 2.85 | 0.48 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 96 | 0.94 | 0.16 | 2010 | 1-1 | 1-1_32210 | 107 | 3.21 | 0.56 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 107 | 1.74 | 0.23 | 2010 | 1-1 | 1-1_32220 | 69 | 1.80 | 0.70 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 120 | 2.65 | 0.19 | 2010 | 1-1 | 1-1_32220 | 82 | 1.84 | 0.19 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21220 | 69 | 0.38 | 0.16 | 2010 | 1-1 | 1-1_32220 | 96 | 2.83 | 0.27 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21220 | 82 | 0.28 | 0.17 | 2010 | 1-1 | 1-1_32220 | 107 | 3.54 | 0.18 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21220 | 96 | 0.75 | 0.25 | 2010 | 1-1 | 1-1_32220 | 120 | 4.33 | 1.46 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21220 | 107 | 0.96 | 0.31 | 2010 | 1-1 | 1-1_32230 | 69 | 1.78 | 0.75 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21230 | 69 | 0.23 | 0.13 | 2010 | 1-1 | 1-1_32230 | 82 | 1.52 | 0.27 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21230 | 82 | 0.18 | 0.08 | 2010 | 1-1 | 1-1_32230 | 96 | 2.09 | 0.26 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21230 | 96 | 0.55 | 0.44 | 2010 | 1-1 | 1-1_32230 | 107 | 3.48 | 0.42 |

| Annee | ldzone | codtrait_zone | jdat | LAI_obs | Ecart | Annee | ldzone | codtrait_zone | jdat | LAI_obs | Ecart |
|-------|--------|---------------|------|---------|-------|-------|--------|---------------|------|---------|-------|
| 2010 | 1-1 | 1-1_32230 | 120 | 4.49 | 0.91 | 2010 | 2-1 | 2-1_12510 | 153 | 3.35 | 1.58 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 69 | 0.73 | 0.24 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 77 | 0.33 | 0.18 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 82 | 0.74 | 0.16 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 99 | 0.56 | 0.21 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 108 | 1.92 | 0.29 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 117 | 0.89 | 0.13 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 69 | 0.87 | 0.18 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 126 | 1.38 | 0.97 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 82 | 0.91 | 0.19 | 2010 | 2-1 | 2-1_41230 | 99 | 0.22 | 0.09 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 108 | 1.69 | 0.03 | 2010 | 2-2 | 2-2_12420 | 78 | 0.54 | 0.17 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41220 | 69 | 0.57 | 0.19 | 2010 | 2-2 | 2-2_12420 | 98 | 1.87 | 1.64 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41220 | 82 | 0.50 | 0.04 | 2010 | 2-2 | 2-2_12420 | 117 | 1.89 | 0.69 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41220 | 108 | 1.79 | 0.21 | 2010 | 2-2 | 2-2_12420 | 127 | 2.38 | 1.64 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41230 | 69 | 0.45 | 0.11 | 2010 | 2-2 | 2-2_12510 | 78 | 0.69 | 0.23 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41230 | 82 | 0.26 | 0.03 | 2010 | 2-2 | 2-2_12510 | 98 | 1.65 | 1.07 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41230 | 108 | 1.41 | 0.44 | 2010 | 2-2 | 2-2_12510 | 117 | 2.22 | 0.83 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42210 | 69 | 0.70 | 0.31 | 2010 | 2-2 | 2-2_12510 | 127 | 2.94 | 1.57 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42210 | 82 | 0.93 | 0.35 | 2010 | 2-2 | 2-2_12510 | 153 | 4.31 | 0.36 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42210 | 97 | 1.34 | 0.29 | 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 78 | 0.48 | 0.18 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42210 | 108 | 1.84 | 0.23 | 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 98 | 0.96 | 1.17 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42210 | 120 | 2.39 | 0.40 | 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 98 | 1.20 | 1.06 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42220 | 69 | 0.42 | 0.10 | 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 117 | 0.48 | 0.10 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42220 | 82 | 0.79 | 0.47 | 2010 | 2-3 | 2-3_12420 | 78 | 0.47 | 0.11 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42220 | 97 | 1.08 | 0.45 | 2010 | 2-3 | 2-3_12420 | 98 | 1.52 | 0.23 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42220 | 108 | 1.84 | 0.64 | 2010 | 2-3 | 2-3_12420 | 117 | 2.72 | 0.63 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42220 | 120 | 1.78 | 0.57 | 2010 | 2-3 | 2-3_12510 | 78 | 0.42 | 0.03 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42230 | 69 | 0.45 | 0.15 | 2010 | 2-3 | 2-3_12510 | 98 | 1.00 | 0.10 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42230 | 82 | 0.48 | 0.09 | 2010 | 2-3 | 2-3_12510 | 117 | 2.13 | 0.31 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42230 | 97 | 0.67 | 0.06 | 2010 | 2-3 | 2-3_12510 | 153 | 4.60 | 0.07 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42230 | 108 | 1.35 | 0.13 | 2010 | 2-3 | 2-3_31220 | 78 | 0.70 | 0.38 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42230 | 120 | 2.01 | 0.75 | 2010 | 2-3 | 2-3_31220 | 98 | 0.87 | 0.28 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 103 | 2.55 | 0.37 | 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | 69 | 0.29 | 0.13 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 91 | 1.78 | 0.19 | 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | 92 | 0.36 | 0.25 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 104 | 3.99 | 0.93 | 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | 106 | 1.35 | 0.09 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 125 | 3.38 | 0.49 | 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | 117 | 2.94 | 0.40 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 91 | 0.60 | 0.26 | 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | 128 | 3.64 | 0.55 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 103 | 1.97 | 0.22 | 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | 140 | 4.46 | 0.29 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12420 | 77 | 1.02 | 1.43 | 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | 152 | 4.56 | 1.12 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12420 | 99 | 0.93 | 0.28 | 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | 164 | 4.89 | 0.50 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12420 | 117 | 2.02 | 1.21 | 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | 62 | 0.13 | 0.07 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12420 | 126 | 2.85 | 0.36 | 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | 69 | 0.49 | 0.59 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12420 | 153 | 3.96 | 1.57 | 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | 92 | 0.61 | 0.46 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12510 | 77 | 0.21 | 0.11 | 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | 106 | 1.55 | 0.51 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12510 | 99 | 1.00 | 0.28 | 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | 117 | 2.73 | 0.17 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12510 | 117 | 2.14 | 1.03 | 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | 128 | 3.22 | 0.76 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12510 | 126 | 2.34 | 1.20 | 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | 140 | 3.77 | 0.62 |

| Annee | ldzone | codtrait_zone | jdat | LAI_obs | Ecart | Annee | ldzone | codtrait_zone | jdat | LAI_obs | Ecart |
|-------|--------|---------------|------|---------|-------|-------|--------|---------------|------|---------|-------|
| 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | 152 | 4.05 | 0.52 | 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | 117 | 2.73 | 0.31 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | 164 | 4.17 | 0.16 | 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | 128 | 3.46 | 0.10 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | 41 | 0.85 | 0.00 | 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | 140 | 3.47 | 0.38 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | 53 | 0.09 | 0.06 | 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | 152 | 4.13 | 0.40 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | 69 | 0.08 | 0.04 | 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | 164 | 4.05 | 0.03 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | 80 | 0.28 | 0.04 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 41 | 0.85 | 0.00 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | 92 | 0.57 | 0.22 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 46 | 1.09 | 0.00 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | 106 | 2.16 | 0.33 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 53 | 1.33 | 0.00 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | 117 | 3.48 | 0.52 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 58 | 1.62 | 0.00 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | 128 | 4.12 | 0.59 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 69 | 0.06 | 0.01 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | 140 | 4.24 | 0.57 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 80 | 0.13 | 0.05 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | 152 | 4.27 | 0.87 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 92 | 0.18 | 0.01 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | 164 | 4.14 | 0.82 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 106 | 0.88 | 0.12 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | 41 | 0.85 | 0.00 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 117 | 2.34 | 0.65 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | 43 | 1.09 | 0.00 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 128 | 3.18 | 0.28 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | 69 | 0.09 | 0.01 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 140 | 3.69 | 0.56 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | 80 | 0.21 | 0.09 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 152 | 3.98 | 0.08 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | 92 | 0.52 | 0.12 | 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | 164 | 4.15 | 0.47 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | 106 | 1.91 | 0.03 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 69 | 0.15 | 0.07 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | 117 | 3.07 | 0.12 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 80 | 0.18 | 0.04 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | 128 | 3.76 | 0.33 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 92 | 0.28 | 0.08 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | 140 | 3.74 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 106 | 0.62 | 0.02 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | 152 | 4.01 | 0.66 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 117 | 1.08 | 0.09 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | 164 | 3.98 | 0.40 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 128 | 2.09 | 0.19 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | 41 | 0.85 | 0.00 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 140 | 1.86 | 0.20 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | 46 | 1.09 | 0.00 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 151 | 2.30 | 0.40 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | 62 | 0.17 | 0.05 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 164 | 3.16 | 0.28 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | 69 | 0.09 | 0.02 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 80 | 0.15 | 0.10 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | 80 | 0.17 | 0.08 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 92 | 0.16 | 0.04 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | 92 | 0.31 | 0.05 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 106 | 0.42 | 0.15 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | 106 | 1.56 | 0.35 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 117 | 0.77 | 0.19 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | 117 | 2.66 | 0.29 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 128 | 1.74 | 0.09 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | 128 | 3.77 | 0.99 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 140 | 1.89 | 0.34 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | 140 | 3.28 | 0.38 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 151 | 2.42 | 0.35 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | 152 | 4.02 | 0.95 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 164 | 3.27 | 0.45 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | 164 | 3.83 | 0.76 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 62 | 0.15 | 0.03 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | 41 | 0.85 | 0.00 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 69 | 0.92 | 0.46 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | 46 | 1.09 | 0.00 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 80 | 0.85 | 0.17 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | 53 | 1.33 | 0.00 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 92 | 2.12 | 0.09 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | 69 | 0.07 | 0.04 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 106 | 3.92 | 0.29 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | 80 | 0.11 | 0.05 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 117 | 4.88 | 0.33 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | 92 | 0.26 | 0.05 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 128 | 4.62 | 0.42 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | 106 | 1.40 | 0.08 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 140 | 4.48 | 0.60 |

| Annee | ldzone | codtrait_zone | jdat | LAI_obs | Ecart | Annee | ldzone | codtrait_zone | jdat | LAI_obs | Ecart |
|-------|--------|---------------|------|---------|-------|-------|--------|---------------|------|---------|-------|
| 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 151 | 2.60 | 0.37 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 106 | 1.65 | 0.29 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 69 | 0.49 | 0.27 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 117 | 2.39 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 80 | 0.95 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 128 | 2.57 | 0.36 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 92 | 1.85 | 0.39 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 140 | 2.54 | 0.51 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 106 | 4.12 | 0.04 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 151 | 2.41 | 0.15 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 117 | 5.27 | 0.26 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 164 | 2.09 | 0.32 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 128 | 4.38 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 83 | 0.30 | 0.25 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 140 | 3.96 | 0.45 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 98 | 0.18 | 0.14 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 151 | 2.19 | 0.51 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 109 | 0.18 | 0.12 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 62 | 0.08 | 0.06 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 125 | 0.46 | 0.27 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 69 | 0.16 | 0.02 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 137 | 0.35 | 0.24 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 80 | 0.36 | 0.10 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 155 | 1.97 | 0.63 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 92 | 0.80 | 0.13 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 169 | 2.01 | 0.93 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 106 | 1.68 | 0.14 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 179 | 2.08 | 0.46 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 117 | 2.21 | 0.20 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 83 | 0.05 | 0.03 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 128 | 2.89 | 0.31 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 98 | 0.06 | 0.03 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 140 | 2.71 | 0.43 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 109 | 0.15 | 0.09 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 151 | 2.45 | 0.05 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 125 | 0.47 | 0.03 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 164 | 2.33 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 137 | 0.79 | 0.10 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 62 | 0.22 | 0.02 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 155 | 1.71 | 0.23 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 69 | 0.18 | 0.04 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 169 | 2.25 | 0.40 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 80 | 0.50 | 0.10 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 179 | 1.68 | 0.15 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 92 | 0.78 | 0.19 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 54 | 0.14 | 0.09 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 106 | 1.75 | 0.09 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 68 | 0.03 | 0.01 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 117 | 2.43 | 0.57 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 83 | 0.08 | 0.06 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 128 | 2.88 | 0.19 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 98 | 0.41 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 140 | 2.63 | 0.44 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 109 | 0.10 | 0.03 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 151 | 2.56 | 0.33 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 125 | 0.79 | 0.21 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 164 | 2.33 | 0.30 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 137 | 1.24 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 62 | 0.05 | 0.02 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 155 | 1.00 | 0.30 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 69 | 0.09 | 0.01 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 68 | 0.03 | 0.01 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 80 | 0.38 | 0.08 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 83 | 0.29 | 0.37 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 92 | 0.72 | 0.10 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 98 | 0.44 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 106 | 1.61 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 109 | 0.23 | 0.09 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 117 | 2.23 | 0.13 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 125 | 0.84 | 0.44 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 128 | 3.11 | 0.37 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 137 | 0.99 | 0.50 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 140 | 2.78 | 0.53 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 155 | 1.21 | 0.30 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 151 | 2.80 | 0.14 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 54 | 0.06 | 0.02 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 164 | 2.32 | 0.23 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 68 | 0.16 | 0.13 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 62 | 0.08 | 0.01 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 83 | 0.32 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 69 | 0.20 | 0.03 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 98 | 0.24 | 0.13 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 80 | 0.55 | 0.10 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 109 | 0.22 | 0.08 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 92 | 0.97 | 0.08 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 125 | 0.80 | 0.22 |

| Annee | ldzone | codtrait_zone | jdat | LAI_obs | Ecart |
|-------|--------|---------------|------|---------|-------|
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 137 | 0.76 | 0.22 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 155 | 1.42 | 0.32 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 169 | 1.17 | 0.37 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 179 | 0.77 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 68 | 0.09 | 0.08 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 83 | 0.18 | 0.07 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 98 | 0.19 | 0.10 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 109 | 0.27 | 0.11 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 125 | 0.50 | 0.11 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 137 | 0.88 | 0.23 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 155 | 1.38 | 0.31 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 169 | 1.38 | 0.19 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 179 | 0.75 | 0.13 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 68 | 0.05 | 0.04 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 83 | 0.08 | 0.04 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 98 | 0.15 | 0.04 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 109 | 0.20 | 0.03 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 125 | 0.51 | 0.39 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 137 | 0.67 | 0.08 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 155 | 1.60 | 0.17 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 169 | 1.15 | 0.41 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 179 | 1.00 | 0.59 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 54 | 0.06 | 0.04 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 68 | 0.12 | 0.13 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 83 | 0.14 | 0.06 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 98 | 0.30 | 0.14 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 109 | 0.55 | 0.33 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 125 | 1.27 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 137 | 1.33 | 0.17 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 155 | 1.73 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 169 | 1.78 | 0.13 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 179 | 1.20 | 0.07 |

4.2. Biomasse et rendement en grain

| annee | ldzone | Codtrait_Zone | jdat | Biomasse | Ecart_Bio | Rdtgrain | Ecart_Rdt |
|-------|--------|---------------|------|----------|-----------|----------|-----------|
| 2010 | 1-1 | 1-1_11420 | 131 | 13.44 | 1.53 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_11420 | 158 | 11.02 | 0.15 | 5.66 | 0.68 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_11610 | 130 | 9.34 | 2.46 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_11610 | 154 | 13.70 | 0.22 | 7.00 | 0.20 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12420 | 129 | 12.18 | 3.56 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12420 | 155 | 14.09 | 0.96 | 6.87 | 0.81 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12510 | 128 | 9.04 | 1.54 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12510 | 153 | 11.93 | 1.94 | 6.53 | 1.10 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12610 | 128 | 10.53 | 1.35 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12610 | 153 | 12.71 | 2.07 | 6.73 | 1.00 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 132 | 4.12 | 0.77 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 153 | 5.25 | 1.14 | 2.40 | 0.61 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 121 | 3.36 | 0.57 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 155 | 6.24 | 0.53 | 2.84 | 0.39 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21220 | 130 | 2.99 | 0.98 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21220 | 163 | 5.91 | 0.96 | 2.63 | 0.51 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21230 | 145 | 4.73 | 1.44 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21230 | 167 | 5.78 | 0.84 | 0.80 | 0.36 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 122 | 4.42 | 0.73 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 153 | 7.66 | 1.86 | 3.53 | 0.87 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_22210 | 120 | 4.16 | 1.01 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_22210 | 153 | 6.53 | 0.75 | 3.13 | 0.81 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_22220 | 127 | 5.42 | 0.58 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_22220 | 159 | 5.91 | 0.96 | 2.63 | 0.51 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_22230 | 135 | 4.43 | 0.53 | | |

| annee | ldzone | Codtrait_Zone | jdat | Biomasse | Ecart_Bio | Rdtgrain | Ecart_Rdt |
|-------|--------|---------------|------|----------|-----------|----------|-----------|
| 2010 | 1-1 | 1-1_22230 | 163 | 5.78 | 0.84 | 0.80 | 0.36 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_31210 | 120 | 3.22 | 0.24 | 1.29 | 0.12 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_31220 | 132 | 3.41 | 0.21 | 1.81 | 0.13 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_31230 | 137 | 3.57 | 0.09 | 1.98 | 0.08 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_32210 | 70 | 2.57 | 0.40 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_32210 | 120 | 2.54 | 0.13 | 1.21 | 0.11 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_32220 | 88 | 3.66 | 0.17 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_32220 | 132 | 3.70 | 0.09 | 1.87 | 0.09 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_32230 | 96 | 2.77 | 0.47 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_32230 | 137 | 3.73 | 0.07 | 1.98 | 0.04 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 102 | 3.38 | 0.75 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 146 | 11.31 | 0.76 | 5.72 | 0.28 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 146 | 11.69 | | 6.19 | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41220 | 154 | 10.74 | 1.12 | 5.41 | 0.68 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41230 | 158 | 10.48 | 1.14 | 5.32 | 0.64 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42210 | 102 | 4.06 | 0.85 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42210 | 143 | 9.97 | 0.54 | 4.89 | 0.10 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42220 | 115 | 4.04 | 0.37 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42220 | 152 | 10.21 | 1.10 | 5.71 | 0.79 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42230 | 121 | 3.76 | 0.44 | | |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42230 | 156 | 9.55 | 0.65 | 5.01 | 0.84 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 128 | 5.26 | 0.78 | | |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 166 | 5.50 | 0.84 | 0.60 | 0.26 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 93 | 2.83 | 0.61 | | |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 139 | 3.39 | 0.27 | 1.49 | 0.04 |

| annee | ldzone | Codtrait | Zone | jdat | Biomasse | Ecart Bio | Rdtgrain | Ecart_Rdt |
|-------|--------|-----------|------|------|----------|-----------|----------|-----------|
| 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | | 117 | 9.14 | 1.87 | | |
| 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | | 168 | 11.94 | 1.04 | 4.11 | 0.21 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12420 | | 177 | 10.57 | 1.88 | 5.00 | 0.19 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12510 | | 170 | 10.90 | 3.90 | 5.71 | 2.11 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_12420 | | 186 | 10.45 | 1.83 | 4.83 | 0.90 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_12510 | | 178 | 9.21 | 2.57 | 4.62 | 1.46 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | | 175 | 1.55 | 0.56 | 0.52 | 0.30 |
| 2010 | 2-3 | 2-3_12420 | | 191 | 6.91 | 0.71 | 2.78 | 0.30 |
| 2010 | 2-3 | 2-3_12510 | | 178 | 9.55 | 2.35 | 4.66 | 1.07 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | | 116 | 3.62 | 1.00 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | | 144 | 6.54 | 0.57 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | | 158 | 5.72 | 0.82 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | | 168 | 12.96 | 1.05 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | | 184 | 14.06 | 0.35 | 5.44 | 0.53 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | | 112 | 2.55 | 0.07 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | | 140 | 6.29 | 2.87 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | | 145 | 4.79 | 1.10 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | | 165 | 9.65 | 1.86 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | | 175 | 13.00 | 3.46 | 6.02 | 0.93 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | | 110 | 2.14 | 0.14 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | | 140 | 6.46 | 1.31 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | | 146 | 6.48 | 2.13 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | | 156 | 11.69 | 1.19 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | | 172 | 11.61 | 1.60 | 6.16 | 1.21 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | | 110 | 2.47 | 0.27 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | | 140 | 5.01 | 0.58 | | |

| annee | ldzone | Codtrait | Zone | jdat | Biomasse | Ecart Bio | Rdtgrain | Ecart_Rdt |
|-------|--------|-----------|------|------|----------|-----------|----------|-----------|
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | | 146 | 5.35 | 2.37 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | | 158 | 10.96 | 4.45 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | | 175 | 11.06 | 2.07 | 5.92 | 1.34 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | | 116 | 1.97 | 0.33 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | | 140 | 4.97 | 1.41 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | | 147 | 6.47 | 2.84 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | | 158 | 10.15 | 3.46 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | | 175 | 10.01 | 0.58 | 5.61 | 0.19 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | | 118 | 2.22 | 0.22 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | | 140 | 6.70 | 0.40 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | | 152 | 8.98 | 0.76 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | | 161 | 11.59 | 1.44 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | | 177 | 11.56 | 3.37 | 5.62 | 0.70 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | | 118 | 1.70 | 0.21 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | | 141 | 5.71 | 1.67 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | | 153 | 8.51 | 1.95 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | | 161 | 10.32 | 1.32 | | |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | | 177 | 11.67 | 1.93 | 5.24 | 0.87 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | | 140 | 1.31 | 0.26 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | | 148 | 3.56 | 0.62 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | | 152 | 4.17 | 0.27 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | | 165 | 4.93 | 1.01 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | | 177 | 6.65 | 0.62 | 2.88 | 0.34 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | | 140 | 1.29 | 0.32 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | | 148 | 3.43 | 1.25 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | | 152 | 4.29 | 0.52 | | |

| annee | ldzone | Codtrait | Zone | jdat | Biomasse | Ecart_Bio | Rdtgrain | Ecart_Rdt |
|-------|--------|-----------|------|------|----------|-----------|----------|-----------|
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | | 169 | 4.95 | 0.38 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | | 179 | 6.23 | 1.12 | 2.41 | 0.84 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | | 93 | 0.56 | 0.16 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | | 102 | 0.69 | 0.04 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | | 106 | 1.00 | 0.06 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | | 125 | 2.59 | 0.19 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | | 148 | 3.79 | 0.62 | 1.35 | 0.25 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | | 95 | 0.60 | 0.08 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | | 105 | 0.73 | 0.17 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | | 110 | 1.17 | 0.13 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | | 125 | 2.35 | 0.10 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | | 149 | 3.52 | 0.41 | 1.44 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | | 83 | 0.23 | 0.00 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | | 107 | 1.57 | 0.09 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | | 123 | 3.03 | 1.15 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | | 156 | 12.28 | 0.96 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | | 166 | 12.90 | 1.51 | 4.83 | 0.61 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | | 83 | 0.24 | 0.03 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | | 110 | 1.67 | 0.09 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | | 123 | 2.31 | 0.39 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | | 157 | 10.61 | 0.44 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | | 167 | 10.41 | 1.57 | 3.43 | 1.47 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | | 94 | 0.40 | 0.03 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | | 115 | 2.20 | 0.21 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | | 127 | 4.01 | 0.73 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | | 159 | 13.24 | 2.52 | | |
| annee | ldzone | Codtrait | Zone | jdat | Biomasse | Ecart_Bio | Rdtgrain | Ecart_Rdt |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | | 169 | 12.40 | 2.27 | 5.12 | 0.57 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | | 83 | 0.31 | 0.01 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | | 107 | 2.18 | 0.19 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | | 123 | 3.12 | 0.61 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | | 156 | 11.15 | 1.36 | | |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | | 168 | 8.54 | 1.04 | 2.59 | 0.48 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | | 162 | 0.49 | 0.09 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | | 176 | 1.66 | 0.34 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | | 190 | 2.53 | 0.54 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | | 218 | 4.73 | 0.88 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | | 229 | 6.53 | 1.26 | 1.22 | 0.31 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | | 164 | 0.38 | 0.11 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | | 178 | 1.45 | 0.43 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | | 193 | 2.15 | 0.15 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | | 220 | 4.45 | 1.02 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | | 230 | 6.27 | 1.47 | 1.08 | 0.32 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | | 102 | 0.13 | 0.05 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | | 112 | 0.29 | 0.06 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | | 131 | 0.42 | 0.09 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | | 150 | 1.28 | 0.46 | 0.46 | 0.12 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | | 103 | 0.08 | 0.00 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | | 114 | 0.16 | 0.03 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | | 134 | 0.23 | 0.03 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | | 154 | 1.08 | 0.15 | 0.41 | 0.10 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | | 80 | 0.16 | 0.07 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | | 109 | 2.21 | 1.58 | | |

| annee | ldzone | Codtrait_Zone | jdat | Biomasse | Ecart_Bio | Rdtgrain | Ecart_Rdt |
|-------|--------|---------------|------|----------|-----------|----------|-----------|
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 144 | 4.66 | 0.46 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 164 | 6.81 | 1.49 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 191 | 11.77 | 3.88 | 3.97 | 1.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 80 | 0.09 | 0.03 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 111 | 1.92 | 0.90 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 145 | 4.14 | 0.79 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 165 | 4.23 | 1.32 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 192 | 6.49 | 1.06 | 1.54 | 1.35 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 84 | 0.11 | 0.02 | | |

| annee | ldzone | Codtrait_Zone | jdat | Biomasse | Ecart_Bio | Rdtgrain | Ecart_Rdt |
|-------|--------|---------------|------|----------|-----------|----------|-----------|
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 115 | 1.18 | 0.55 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 148 | 2.54 | 0.65 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 168 | 3.18 | 1.10 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 196 | 6.97 | 0.60 | 2.36 | 0.58 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 79 | 0.28 | 0.12 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 107 | 4.60 | 2.58 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 142 | 4.83 | 1.51 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 164 | 10.61 | 4.32 | | |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 189 | 10.59 | 4.49 | 4.29 | 2.08 |

4.3. Composant du rendement

| annee | ldzone | codtrait_zone | grain_plant | P1000 | Densite | Nbgrains_m² | rdtgrain_m² |
|-------|--------|---------------|-------------|-------|---------|-------------|-------------|
| 2010 | 1-1 | 1-1_11420 | 608.1 | 30.4 | 94.3 | 57002.9 | 566.3 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_11610 | 765.2 | 30.4 | 49.3 | 37676.2 | 700.0 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12420 | 602.2 | 30.4 | 75.3 | 44998.6 | 686.7 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12510 | 751.7 | 30.4 | 41.3 | 31074.5 | 653.3 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_12610 | 666.9 | 30.4 | 49.3 | 33156.7 | 673.3 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 734.2 | 24.5 | 23.3 | 17328.1 | 240.0 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 538.6 | 24.9 | 23.7 | 12788.3 | 284.0 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21220 | 550.6 | 24.8 | 24.0 | 13312.4 | 263.3 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21230 | 544.8 | 24.9 | 20.0 | 10895.1 | 80.0 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 889.2 | 24.5 | 25.0 | 22588.5 | 353.3 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_22210 | 701.5 | 24.8 | 29.3 | 20469.3 | 313.3 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_22220 | 640.7 | | 24.3 | 15444.8 | 263.3 |

| annee | ldzone | codtrait_zone | grain_plant | P1000 | Densite | Nbgrains_m² | rdtgrain_m² |
|-------|--------|---------------|-------------|-------|---------|-------------|-------------|
| 2010 | 1-1 | 1-1_22230 | 654.3 | | 19.0 | 12436.1 | 80.0 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_31210 | 32.5 | 190.1 | 46.7 | 1508.9 | 128.9 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_31220 | 56.2 | 190.0 | 38.7 | 2176.6 | 181.1 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_31230 | 57.7 | 190.0 | 43.7 | 2522.7 | 197.8 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_32210 | 34.9 | 190.1 | 41.6 | 1462.5 | 121.1 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_32220 | 58.9 | 190.0 | 37.0 | 2181.0 | 186.7 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_32230 | 56.1 | 190.0 | 44.2 | 2400.0 | 197.8 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 469.5 | 230.0 | 5.8 | 2710.0 | 572.2 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | | 229.2 | 5.7 | | 619.3 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41220 | 472.1 | 230.6 | 6.9 | 3273.4 | 541.0 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41230 | 466.5 | 230.0 | 5.8 | 2696.6 | 531.6 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42210 | 501.5 | 230.9 | 5.8 | 2908.4 | 488.9 |

| annee | ldzone | codtrait | zone | grain_plant | P1000 | Densite | Nbgrains_m² | rdtgrain_m² |
|-------|--------|-----------|------|-------------|-------|---------|-------------|-------------|
| 2010 | 1-1 | 1-1_42220 | | 507.3 | 229.0 | 6.1 | 3116.6 | 570.8 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_42230 | | 495.0 | 229.2 | 6.2 | 3081.7 | 500.8 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | | 71.6 | 24.8 | 36.0 | 2608.7 | 60.0 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | | 54.1 | 190.1 | 26.8 | 1452.6 | 148.9 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | | 376.7 | 231.0 | 7.2 | 2718.6 | 411.1 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12420 | | 676.1 | 26.7 | 55.5 | 37466.8 | 500.1 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_12510 | | 656.3 | 29.2 | 41.5 | 27463.1 | 571.3 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_12420 | | 177.7 | 27.1 | 113.7 | 20052.6 | 483.1 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_12510 | | 465.7 | 29.4 | 66.7 | 30780.9 | 461.8 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | | | 252.8 | 1.3 | | 52.1 |
| 2010 | 2-3 | 2-3_12420 | | 126.3 | 25.1 | 106.0 | 13506.8 | 277.8 |
| 2010 | 2-3 | 2-3_12510 | | 508.9 | 29.6 | 45.3 | 22899.3 | 466.3 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11420 | | 564.6 | 25.8 | 69.3 | 39367.2 | 543.8 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_11510 | | 662.9 | 25.7 | 51.0 | 33857.1 | 602.3 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12511 | | 926.4 | 25.8 | 41.3 | 38539.7 | 616.4 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12512 | | 1130.1 | 25.6 | 39.3 | 43187.3 | 592.3 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12513 | | 1035.9 | 26.0 | 38.7 | 39766.8 | 560.6 |
| 2011 | 1-1 | 1-1_12514 | | 924.4 | 25.7 | 42.7 | 39395.5 | 561.7 |

| annee | ldzone | codtrait | zone | grain_plant | P1000 | Densite | Nbgrains_m² | rdtgrain_m² |
|-------|--------|-----------|------|-------------|-------|---------|-------------|-------------|
| 2011 | 1-1 | 1-1_12515 | | 1090.9 | 25.8 | 35.3 | 38689.3 | 523.6 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | | 847.0 | 24.2 | 19.7 | 16654.6 | 397.8 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | | 935.7 | 24.0 | 19.0 | 17778.3 | 240.8 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | | 70.5 | 199.3 | 28.9 | 2073.8 | 134.7 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | | 66.1 | 191.0 | 32.7 | 2203.2 | 143.8 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | | 413.7 | 268.2 | 6.0 | 2483.6 | 482.6 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | | 349.1 | 263.2 | 6.0 | 2094.4 | 342.6 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | | 356.1 | 263.0 | 9.4 | 3345.4 | 511.8 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | | 308.3 | 263.0 | 6.0 | 1852.3 | 258.6 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | | 360.3 | 23.5 | 14.6 | 5171.8 | 121.7 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | | 310.9 | 22.9 | 15.1 | 4724.3 | 108.3 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | | 38.3 | 165.0 | 12.8 | 544.3 | 46.2 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | | 52.7 | 164.7 | 9.1 | 483.0 | 40.9 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | | 232.4 | 240.1 | 6.7 | 1479.5 | 397.3 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | | 223.0 | 230.8 | 5.3 | 1407.4 | 154.3 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | | 196.6 | 230.5 | 4.9 | 928.1 | 236.0 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | | 233.8 | 236.3 | 8.8 | 2186.2 | 428.7 |

4.4. Humidité pondérale du sol

| annee | ldzone | codtrait zone | jul | prof | Hs |
|-------|--------|---------------|-----|--------|------|
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 40 | 0-20 | 0.56 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 40 | 20-40 | 0.45 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 40 | 40-60 | 0.48 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 40 | 60-80 | 0.44 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 40 | 80-100 | 0.46 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 59 | 0-20 | 0.40 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 59 | 20-40 | 0.39 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 59 | 40-60 | 0.49 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 59 | 60-80 | 0.43 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 59 | 80-100 | 0.46 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 71 | 0-20 | 0.39 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 71 | 20-40 | 0.42 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 71 | 40-60 | 0.39 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 71 | 60-80 | 0.23 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 71 | 80-100 | 0.19 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 79 | 0-20 | 0.39 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 79 | 20-40 | 0.42 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 79 | 40-60 | 0.39 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 79 | 60-80 | 0.23 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21110 | 79 | 80-100 | 0.19 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 40 | 0-20 | 0.43 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 40 | 20-40 | 0.39 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 40 | 40-60 | 0.38 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 40 | 60-80 | 0.38 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 40 | 80-100 | 0.36 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 59 | 0-20 | 0.48 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 59 | 20-40 | 0.50 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 59 | 40-60 | 0.42 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 59 | 60-80 | 0.44 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 59 | 80-100 | 0.24 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 71 | 0-20 | 0.34 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 71 | 20-40 | 0.42 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 71 | 40-60 | 0.40 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 71 | 60-80 | 0.35 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 71 | 80-100 | 0.28 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 79 | 0-20 | 0.34 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 79 | 20-40 | 0.42 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 79 | 40-60 | 0.40 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 79 | 60-80 | 0.35 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21210 | 79 | 80-100 | 0.28 |

| annee | ldzone | codtrait zone | jul | prof | Hs |
|-------|--------|---------------|-----|--------|------|
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 40 | 0-20 | 0.35 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 40 | 20-40 | 0.51 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 40 | 40-60 | 0.46 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 40 | 60-80 | 0.56 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 40 | 80-100 | 0.49 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 59 | 0-20 | 0.59 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 59 | 20-40 | 0.45 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 59 | 40-60 | 0.41 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 59 | 60-80 | 0.39 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 59 | 80-100 | 0.33 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 71 | 0-20 | 0.43 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 71 | 20-40 | 0.44 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 71 | 40-60 | 0.33 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 71 | 60-80 | 0.31 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 71 | 80-100 | 0.29 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 79 | 0-20 | 0.43 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 79 | 20-40 | 0.44 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 79 | 40-60 | 0.33 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 79 | 60-80 | 0.31 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_21310 | 79 | 80-100 | 0.29 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 40 | 0-20 | 0.35 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 40 | 20-40 | 0.40 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 40 | 40-60 | 0.33 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 40 | 60-80 | 0.37 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 40 | 80-100 | 0.38 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 59 | 0-20 | 0.41 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 59 | 20-40 | 0.34 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 59 | 40-60 | 0.30 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 59 | 60-80 | 0.37 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 59 | 80-100 | 0.30 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 71 | 0-20 | 0.38 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 71 | 20-40 | 0.37 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 71 | 40-60 | 0.34 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 71 | 60-80 | 0.27 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41110 | 71 | 80-100 | 0.25 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 40 | 0-20 | 0.28 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 40 | 20-40 | 0.30 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 40 | 40-60 | 0.36 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 40 | 60-80 | 0.36 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 40 | 80-100 | 0.34 |

| annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs | annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs |
|-------|--------|---------------|-----|--------|------|-------|--------|---------------|-----|--------|------|
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 59 | 0-20 | 0.34 | 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 121 | 60-80 | 0.18 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 59 | 20-40 | 0.30 | 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 121 | 80-100 | 0.17 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 59 | 40-60 | 0.32 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 86 | 0-20 | 0.14 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 59 | 60-80 | 0.26 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 86 | 20-40 | 0.09 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 59 | 80-100 | 0.32 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 86 | 40-60 | 0.09 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 71 | 0-20 | 0.35 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 86 | 60-80 | 0.11 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 71 | 20-40 | 0.31 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 86 | 80-100 | 0.10 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 71 | 40-60 | 0.29 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 102 | 0-20 | 0.15 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 71 | 60-80 | 0.33 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 102 | 20-40 | 0.16 |
| 2010 | 1-1 | 1-1_41210 | 71 | 80-100 | 0.34 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 102 | 40-60 | 0.26 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 86 | 0-20 | 0.05 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 102 | 60-80 | 0.16 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 86 | 20-40 | 0.05 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 102 | 80-100 | 0.27 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 86 | 40-60 | 0.06 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 121 | 0-20 | 0.13 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 86 | 60-80 | 0.05 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 121 | 20-40 | 0.16 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 86 | 80-100 | 0.05 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 121 | 40-60 | 0.19 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 102 | 0-20 | 0.14 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 121 | 60-80 | 0.23 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 102 | 20-40 | 0.16 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 121 | 80-100 | 0.19 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 102 | 40-60 | 0.19 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 140 | 0-20 | 0.09 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 102 | 60-80 | 0.19 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 140 | 20-40 | 0.13 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 102 | 80-100 | 0.17 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 140 | 40-60 | 0.17 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 121 | 0-20 | 0.13 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 140 | 60-80 | 0.22 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 121 | 20-40 | 0.14 | 2010 | 1-2 | 1-2_41230 | 140 | 80-100 | 0.23 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 121 | 40-60 | 0.17 | 2010 | 2-1 | 2-1_21230 | 97 | 0-20 | 0.29 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 121 | 60-80 | 0.17 | 2010 | 2-1 | 2-1_21230 | 97 | 20-40 | 0.31 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 121 | 80-100 | 0.17 | 2010 | 2-1 | 2-1_21230 | 97 | 40-60 | 0.26 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 140 | 0-20 | 0.09 | 2010 | 2-1 | 2-1_21230 | 97 | 60-80 | 0.24 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 140 | 20-40 | 0.09 | 2010 | 2-1 | 2-1_21230 | 97 | 80-100 | 0.23 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 140 | 40-60 | 0.12 | 2010 | 2-1 | 2-1_21230 | 127 | 0-20 | 0.29 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 140 | 60-80 | 0.16 | 2010 | 2-1 | 2-1_21230 | 127 | 20-40 | 0.26 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_21210 | 140 | 80-100 | 0.16 | 2010 | 2-1 | 2-1_21230 | 127 | 40-60 | 0.27 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 86 | 0-20 | 0.06 | 2010 | 2-1 | 2-1_21230 | 127 | 60-80 | 0.24 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 86 | 20-40 | 0.07 | 2010 | 2-1 | 2-1_21230 | 127 | 80-100 | 0.23 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 86 | 40-60 | 0.07 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 97 | 0-20 | 0.29 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 86 | 60-80 | 0.07 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 97 | 20-40 | 0.30 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 86 | 80-100 | 0.06 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 97 | 40-60 | 0.25 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 102 | 0-20 | 0.22 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 97 | 60-80 | 0.23 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 102 | 20-40 | 0.23 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 97 | 80-100 | 0.23 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 102 | 40-60 | 0.23 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 127 | 0-20 | 0.28 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 102 | 60-80 | 0.19 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 127 | 20-40 | 0.26 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 102 | 80-100 | 0.19 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 127 | 40-60 | 0.24 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 121 | 0-20 | 0.18 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 127 | 60-80 | 0.23 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 121 | 20-40 | 0.20 | 2010 | 2-1 | 2-1_31230 | 127 | 80-100 | 0.23 |
| 2010 | 1-2 | 1-2_31230 | 121 | 40-60 | 0.19 | 2010 | 2-1 | 2-1_41230 | 97 | 0-20 | 0.29 |

| annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs | annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs |
|-------|--------|---------------|-----|--------|------|-------|--------|---------------|-----|--------|------|
| 2010 | 2-1 | 2-1_41230 | 97 | 20-40 | 0.29 | 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 128 | 80-100 | 0.26 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_41230 | 97 | 40-60 | 0.22 | 2010 | 2-2 | 2-2_41220 | 39 | 0-20 | 0.25 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_41230 | 97 | 60-80 | 0.24 | 2010 | 2-2 | 2-2_41220 | 98 | 0-20 | 0.24 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_41230 | 97 | 80-100 | 0.26 | 2010 | 2-2 | 2-2_41220 | 98 | 20-40 | 0.25 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_41230 | 127 | 0-20 | 0.28 | 2010 | 2-2 | 2-2_41220 | 98 | 40-60 | 0.26 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_41230 | 127 | 20-40 | 0.28 | 2010 | 2-2 | 2-2_41220 | 98 | 60-80 | 0.25 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_41230 | 127 | 40-60 | 0.27 | 2010 | 2-2 | 2-2_41220 | 98 | 80-100 | 0.25 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_41230 | 127 | 60-80 | 0.24 | 2010 | 2-3 | 2-3_21220 | 39 | 0-20 | 0.24 |
| 2010 | 2-1 | 2-1_41230 | 127 | 80-100 | 0.22 | 2010 | 2-3 | 2-3_31220 | 39 | 0-20 | 0.25 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21110 | 39 | 0-20 | 0.26 | 2010 | 2-3 | 2-3_31220 | 98 | 0-20 | 0.22 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21110 | 98 | 0-20 | 0.23 | 2010 | 2-3 | 2-3_31220 | 98 | 20-40 | 0.24 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21110 | 98 | 20-40 | 0.22 | 2010 | 2-3 | 2-3_31220 | 98 | 40-60 | 0.26 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21110 | 98 | 40-60 | 0.27 | 2010 | 2-3 | 2-3_31220 | 98 | 60-80 | 0.27 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21110 | 98 | 60-80 | 0.33 | 2010 | 2-3 | 2-3_31220 | 98 | 80-100 | 0.27 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21110 | 98 | 80-100 | 0.28 | 2010 | 2-3 | 2-3_41220 | 39 | 0-20 | 0.25 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21220 | 39 | 0-20 | 0.25 | 2010 | 2-3 | 2-3_41220 | 98 | 0-20 | 0.25 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21310 | 39 | 0-20 | 0.20 | 2010 | 2-3 | 2-3_41220 | 98 | 20-40 | 0.24 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21310 | 98 | 0-20 | 0.19 | 2010 | 2-3 | 2-3_41220 | 98 | 40-60 | 0.25 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21310 | 98 | 20-40 | 0.26 | 2010 | 2-3 | 2-3_41220 | 98 | 60-80 | 0.21 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21310 | 98 | 40-60 | 0.17 | 2010 | 2-3 | 2-3_41220 | 98 | 80-100 | 0.23 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21310 | 98 | 60-80 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 43 | 0-20 | 0.15 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_21310 | 98 | 80-100 | 0.25 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 43 | 20-40 | 0.19 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 39 | 0-20 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 43 | 40-60 | 0.20 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 98 | 0-20 | 0.26 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 43 | 60-80 | 0.22 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 98 | 20-40 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 43 | 80-100 | 0.24 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 98 | 40-60 | 0.18 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 63 | 0-20 | 0.16 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 98 | 60-80 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 63 | 20-40 | 0.18 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 98 | 80-100 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 63 | 40-60 | 0.23 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 128 | 0-20 | 0.26 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 63 | 60-80 | 0.21 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 128 | 20-40 | 0.26 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 63 | 80-100 | 0.19 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 128 | 40-60 | 0.26 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 80 | 0-20 | 0.19 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 128 | 60-80 | 0.25 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 80 | 20-40 | 0.21 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_31220 | 128 | 80-100 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 80 | 40-60 | 0.23 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 39 | 0-20 | 0.13 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 80 | 60-80 | 0.25 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 98 | 0-20 | 0.25 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 80 | 80-100 | 0.23 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 98 | 20-40 | 0.30 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 94 | 0-20 | 0.16 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 98 | 40-60 | 0.26 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 94 | 20-40 | 0.17 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 98 | 60-80 | 0.26 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 94 | 40-60 | 0.20 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 98 | 80-100 | 0.27 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 94 | 60-80 | 0.24 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 128 | 0-20 | 0.32 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 94 | 80-100 | 0.24 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 128 | 20-40 | 0.30 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 109 | 0-20 | 0.18 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 128 | 40-60 | 0.29 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 109 | 20-40 | 0.20 |
| 2010 | 2-2 | 2-2_41110 | 128 | 60-80 | 0.29 | 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 109 | 40-60 | 0.21 |

| annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs | annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs |
|-------|--------|---------------|-----|--------|------|-------|--------|---------------|-----|--------|------|
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 109 | 60-80 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 150 | 20-40 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 109 | 80-100 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 150 | 40-60 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 126 | 0-20 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 150 | 60-80 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 126 | 20-40 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 150 | 80-100 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 126 | 40-60 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 165 | 0-20 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 126 | 60-80 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 165 | 20-40 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 126 | 80-100 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 165 | 40-60 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 150 | 0-20 | 0.14 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 165 | 60-80 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 150 | 20-40 | 0.14 | 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 165 | 80-100 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 150 | 40-60 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 43 | 0-20 | 0.15 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 150 | 60-80 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 43 | 20-40 | 0.15 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 150 | 80-100 | 0.18 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 43 | 40-60 | 0.16 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 165 | 0-20 | 0.17 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 43 | 60-80 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 165 | 20-40 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 43 | 80-100 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 165 | 40-60 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 63 | 0-20 | 0.15 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 165 | 60-80 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 63 | 20-40 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21220 | 165 | 80-100 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 63 | 40-60 | 0.16 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 63 | 0-20 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 63 | 60-80 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 63 | 20-40 | 0.19 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 63 | 80-100 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 63 | 40-60 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 80 | 0-20 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 63 | 60-80 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 80 | 20-40 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 63 | 80-100 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 80 | 40-60 | 0.23 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 80 | 0-20 | 0.19 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 80 | 60-80 | 0.25 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 80 | 20-40 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 80 | 80-100 | 0.26 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 80 | 40-60 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 94 | 0-20 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 80 | 60-80 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 94 | 20-40 | 0.16 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 80 | 80-100 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 94 | 40-60 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 94 | 0-20 | 0.17 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 94 | 60-80 | 0.25 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 94 | 20-40 | 0.19 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 94 | 80-100 | 0.24 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 94 | 40-60 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 109 | 0-20 | 0.24 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 94 | 60-80 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 109 | 20-40 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 94 | 80-100 | 0.19 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 109 | 40-60 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 109 | 0-20 | 0.19 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 109 | 60-80 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 109 | 20-40 | 0.25 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 109 | 80-100 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 109 | 40-60 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 126 | 0-20 | 0.23 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 109 | 60-80 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 126 | 20-40 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 109 | 80-100 | 0.27 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 126 | 40-60 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 126 | 0-20 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 126 | 60-80 | 0.26 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 126 | 20-40 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 126 | 80-100 | 0.25 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 126 | 40-60 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 150 | 0-20 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 126 | 60-80 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 150 | 20-40 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 126 | 80-100 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 150 | 40-60 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_21230 | 150 | 0-20 | 0.12 | 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 150 | 60-80 | 0.24 |

| annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs | annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs |
|-------|--------|---------------|-----|--------|------|-------|--------|---------------|-----|--------|------|
| 2011 | 1-2 | 1-2_31220 | 150 | 80-100 | 0.25 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 80 | 40-60 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 63 | 0-20 | 0.18 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 80 | 60-80 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 63 | 20-40 | 0.18 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 80 | 80-100 | 0.23 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 63 | 40-60 | 0.18 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 94 | 0-20 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 63 | 60-80 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 94 | 20-40 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 63 | 80-100 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 94 | 40-60 | 0.25 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 80 | 0-20 | 0.18 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 94 | 60-80 | 0.21 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 80 | 20-40 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 94 | 80-100 | 0.23 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 80 | 40-60 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 109 | 0-20 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 80 | 60-80 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 109 | 20-40 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 80 | 80-100 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 109 | 40-60 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 94 | 0-20 | 0.17 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 109 | 60-80 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 94 | 20-40 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 109 | 80-100 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 94 | 40-60 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 126 | 0-20 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 94 | 60-80 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 126 | 20-40 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 94 | 80-100 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 126 | 40-60 | 0.21 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 109 | 0-20 | 0.19 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 126 | 60-80 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 109 | 20-40 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 126 | 80-100 | 0.23 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 109 | 40-60 | 0.26 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 150 | 0-20 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 109 | 60-80 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 150 | 20-40 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 109 | 80-100 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 150 | 40-60 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 126 | 0-20 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 150 | 60-80 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 126 | 20-40 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 150 | 80-100 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 126 | 40-60 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 165 | 0-20 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 126 | 60-80 | 0.25 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 165 | 20-40 | 0.21 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 126 | 80-100 | 0.25 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 165 | 40-60 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 150 | 0-20 | 0.16 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 165 | 60-80 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 150 | 20-40 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 165 | 80-100 | 0.24 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 150 | 40-60 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 43 | 0-20 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 150 | 60-80 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 43 | 20-40 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_31230 | 150 | 80-100 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 43 | 40-60 | 0.15 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 43 | 0-20 | 0.15 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 43 | 60-80 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 43 | 20-40 | 0.17 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 43 | 80-100 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 43 | 40-60 | 0.16 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 63 | 0-20 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 43 | 60-80 | 0.19 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 63 | 20-40 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 43 | 80-100 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 63 | 40-60 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 63 | 0-20 | 0.19 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 63 | 60-80 | 0.16 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 63 | 20-40 | 0.17 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 63 | 80-100 | 0.16 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 63 | 40-60 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 80 | 0-20 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 63 | 60-80 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 80 | 20-40 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 63 | 80-100 | 0.16 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 80 | 40-60 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 80 | 0-20 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 80 | 60-80 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41120 | 80 | 20-40 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 80 | 80-100 | 0.22 |

| annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs | annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs |
|-------|--------|---------------|-----|--------|------|-------|--------|---------------|-----|--------|------|
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 94 | 0-20 | 0.16 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 109 | 60-80 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 94 | 20-40 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 109 | 80-100 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 94 | 40-60 | 0.19 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 126 | 0-20 | 0.21 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 94 | 60-80 | 0.18 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 126 | 20-40 | 0.24 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 94 | 80-100 | 0.18 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 126 | 40-60 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 109 | 0-20 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 126 | 60-80 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 109 | 20-40 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 126 | 80-100 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 109 | 40-60 | 0.19 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 150 | 0-20 | 0.15 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 109 | 60-80 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 150 | 20-40 | 0.21 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 109 | 80-100 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 150 | 40-60 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 126 | 0-20 | 0.19 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 150 | 60-80 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 126 | 20-40 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 150 | 80-100 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 126 | 40-60 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 165 | 0-20 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 126 | 60-80 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 165 | 20-40 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 126 | 80-100 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 165 | 40-60 | 0.23 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 150 | 0-20 | 0.18 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 165 | 60-80 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 150 | 20-40 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 165 | 80-100 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 150 | 40-60 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 43 | 0-20 | 0.13 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 150 | 60-80 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 43 | 20-40 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 150 | 80-100 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 43 | 40-60 | 0.17 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 165 | 0-20 | 0.27 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 43 | 60-80 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 165 | 20-40 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 43 | 80-100 | 0.21 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 165 | 40-60 | 0.17 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 63 | 0-20 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 165 | 60-80 | 0.17 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 63 | 20-40 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41220 | 165 | 80-100 | 0.18 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 63 | 40-60 | 0.16 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 63 | 0-20 | 0.18 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 63 | 60-80 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 63 | 20-40 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 63 | 80-100 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 63 | 40-60 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 80 | 0-20 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 63 | 60-80 | 0.19 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 80 | 20-40 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 63 | 80-100 | 0.15 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 80 | 40-60 | 0.21 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 80 | 0-20 | 0.14 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 80 | 60-80 | 0.19 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 80 | 20-40 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 80 | 80-100 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 80 | 40-60 | 0.24 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 94 | 0-20 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 80 | 60-80 | 0.22 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 94 | 20-40 | 0.20 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 80 | 80-100 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 94 | 40-60 | 0.21 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 94 | 0-20 | 0.18 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 94 | 60-80 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 94 | 20-40 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 94 | 80-100 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 94 | 40-60 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 109 | 0-20 | 0.15 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 94 | 60-80 | 0.21 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 109 | 20-40 | 0.21 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 94 | 80-100 | 0.17 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 109 | 40-60 | 0.21 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 109 | 0-20 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 109 | 60-80 | 0.18 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 109 | 20-40 | 0.23 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 109 | 80-100 | 0.22 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41230 | 109 | 40-60 | 0.20 | 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 126 | 0-20 | 0.14 |

| annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs | annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs |
|-------|--------|---------------|-----|--------|------|-------|--------|---------------|-----|--------|------|
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 126 | 20-40 | 0.23 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 136 | 80-100 | 0.28 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 126 | 40-60 | 0.23 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 154 | 0-20 | 0.21 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 126 | 60-80 | 0.21 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 154 | 20-40 | 0.27 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 126 | 80-100 | 0.19 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 154 | 40-60 | 0.26 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 150 | 0-20 | 0.18 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 154 | 60-80 | 0.30 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 150 | 20-40 | 0.21 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 154 | 80-100 | 0.23 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 150 | 40-60 | 0.19 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 180 | 0-20 | 0.28 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 150 | 60-80 | 0.20 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 180 | 20-40 | 0.28 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 150 | 80-100 | 0.19 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 180 | 40-60 | 0.30 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 165 | 0-20 | 0.19 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 180 | 60-80 | 0.32 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 165 | 20-40 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 180 | 80-100 | 0.32 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 165 | 40-60 | 0.18 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 215 | 0-20 | 0.27 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 165 | 60-80 | 0.18 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 215 | 20-40 | 0.27 |
| 2011 | 1-2 | 1-2_41320 | 165 | 80-100 | 0.19 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 215 | 40-60 | 0.28 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 30 | 0-20 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 215 | 60-80 | 0.29 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 30 | 20-40 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 215 | 80-100 | 0.29 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 30 | 40-60 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 41 | 0-20 | 0.22 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 30 | 60-80 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 41 | 20-40 | 0.23 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 30 | 80-100 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 41 | 40-60 | 0.23 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 54 | 0-20 | 0.23 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 41 | 60-80 | 0.22 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 54 | 20-40 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 41 | 80-100 | 0.23 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 54 | 40-60 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 69 | 0-20 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 54 | 60-80 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 69 | 20-40 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 54 | 80-100 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 69 | 40-60 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 69 | 0-20 | 0.23 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 69 | 60-80 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 69 | 20-40 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 69 | 80-100 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 69 | 40-60 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 98 | 0-20 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 69 | 60-80 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 98 | 20-40 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 69 | 80-100 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 98 | 40-60 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 98 | 0-20 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 98 | 60-80 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 98 | 20-40 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 98 | 80-100 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 98 | 40-60 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 117 | 0-20 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 98 | 60-80 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 117 | 20-40 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 98 | 80-100 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 117 | 40-60 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 117 | 0-20 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 117 | 60-80 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 117 | 20-40 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 117 | 80-100 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 117 | 40-60 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 136 | 0-20 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 117 | 60-80 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 136 | 20-40 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 117 | 80-100 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 136 | 40-60 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 136 | 0-20 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 136 | 60-80 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 136 | 20-40 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 136 | 80-100 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 136 | 40-60 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 154 | 0-20 | 0.21 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21210 | 136 | 60-80 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 154 | 20-40 | 0.25 |

| annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs | annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs |
|-------|--------|---------------|-----|--------|------|-------|--------|---------------|-----|--------|------|
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 154 | 40-60 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 154 | 0-20 | 0.22 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 154 | 60-80 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 154 | 20-40 | 0.28 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 154 | 80-100 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 154 | 40-60 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 180 | 0-20 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 154 | 60-80 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 180 | 20-40 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 154 | 80-100 | 0.23 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 180 | 40-60 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 41 | 0-20 | 0.21 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 180 | 60-80 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 41 | 20-40 | 0.22 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 180 | 80-100 | 0.30 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 41 | 40-60 | 0.23 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 215 | 0-20 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 41 | 60-80 | 0.23 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 215 | 20-40 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 41 | 80-100 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 215 | 40-60 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 69 | 0-20 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 215 | 60-80 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 69 | 20-40 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_21220 | 215 | 80-100 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 69 | 40-60 | 0.23 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 30 | 0-20 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 69 | 60-80 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 30 | 20-40 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 69 | 80-100 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 30 | 40-60 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 98 | 0-20 | 0.23 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 30 | 60-80 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 98 | 20-40 | 0.22 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 30 | 80-100 | 0.23 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 98 | 40-60 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 54 | 0-20 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 98 | 60-80 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 54 | 20-40 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 98 | 80-100 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 54 | 40-60 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 117 | 0-20 | 0.21 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 54 | 60-80 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 117 | 20-40 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 54 | 80-100 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 117 | 40-60 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 69 | 0-20 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 117 | 60-80 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 69 | 20-40 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 117 | 80-100 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 69 | 40-60 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 136 | 0-20 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 69 | 60-80 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 136 | 20-40 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 69 | 80-100 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 136 | 40-60 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 98 | 0-20 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 136 | 60-80 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 98 | 20-40 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 136 | 80-100 | 0.28 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 98 | 40-60 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 154 | 0-20 | 0.21 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 98 | 60-80 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 154 | 20-40 | 0.22 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 98 | 80-100 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 154 | 40-60 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 117 | 0-20 | 0.21 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 154 | 60-80 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 117 | 20-40 | 0.23 | 2011 | 2-3 | 2-3_31220 | 154 | 80-100 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 117 | 40-60 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 30 | 0-20 | 0.22 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 117 | 60-80 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 30 | 20-40 | 0.22 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 117 | 80-100 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 30 | 40-60 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 136 | 0-20 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 30 | 60-80 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 136 | 20-40 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 30 | 80-100 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 136 | 40-60 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 54 | 0-20 | 0.20 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 136 | 60-80 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 54 | 20-40 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_31210 | 136 | 80-100 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 54 | 40-60 | 0.25 |

| annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs | annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs |
|-------|--------|---------------|-----|--------|------|-------|--------|---------------|-----|--------|------|
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 54 | 60-80 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 69 | 20-40 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 54 | 80-100 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 69 | 40-60 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 69 | 0-20 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 69 | 60-80 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 69 | 20-40 | 0.23 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 69 | 80-100 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 69 | 40-60 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 98 | 0-20 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 69 | 60-80 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 98 | 20-40 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 69 | 80-100 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 98 | 40-60 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 98 | 0-20 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 98 | 60-80 | 0.29 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 98 | 20-40 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 98 | 80-100 | 0.29 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 98 | 40-60 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 117 | 0-20 | 0.22 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 98 | 60-80 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 117 | 20-40 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 98 | 80-100 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 117 | 40-60 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 117 | 0-20 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 117 | 60-80 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 117 | 20-40 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 117 | 80-100 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 117 | 40-60 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 136 | 0-20 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 117 | 60-80 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 136 | 20-40 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 117 | 80-100 | 0.23 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 136 | 40-60 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 136 | 0-20 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 136 | 60-80 | 0.28 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 136 | 20-40 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 136 | 80-100 | 0.30 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 136 | 40-60 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 154 | 0-20 | 0.20 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 136 | 60-80 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 154 | 20-40 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 136 | 80-100 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 154 | 40-60 | 0.29 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 154 | 0-20 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 154 | 60-80 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 154 | 20-40 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 154 | 80-100 | 0.22 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 154 | 40-60 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 180 | 0-20 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 154 | 60-80 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 180 | 20-40 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 154 | 80-100 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 180 | 40-60 | 0.28 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 180 | 0-20 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 180 | 60-80 | 0.29 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 180 | 20-40 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 180 | 80-100 | 0.29 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 180 | 40-60 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 41 | 0-20 | 0.22 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 180 | 60-80 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 41 | 20-40 | 0.23 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41110 | 180 | 80-100 | 0.23 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 41 | 40-60 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 30 | 0-20 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 41 | 60-80 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 30 | 20-40 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 41 | 80-100 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 30 | 40-60 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 69 | 0-20 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 30 | 60-80 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 69 | 20-40 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 30 | 80-100 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 69 | 40-60 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 54 | 0-20 | 0.19 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 69 | 60-80 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 54 | 20-40 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 69 | 80-100 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 54 | 40-60 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 98 | 0-20 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 54 | 60-80 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 98 | 20-40 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 54 | 80-100 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 98 | 40-60 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41210 | 69 | 0-20 | 0.22 | 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 98 | 60-80 | 0.28 |

| annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs | annee | ldzone | codtrait_zone | jul | prof | Hs |
|-------|--------|---------------|-----|--------|------|-------|--------|---------------|-----|--------|------|
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 98 | 80-100 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 69 | 0-20 | 0.24 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 117 | 0-20 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 69 | 20-40 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 117 | 20-40 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 69 | 40-60 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 117 | 40-60 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 69 | 60-80 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 117 | 60-80 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 69 | 80-100 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 117 | 80-100 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 98 | 0-20 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 136 | 0-20 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 98 | 20-40 | 0.49 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 136 | 20-40 | 0.25 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 98 | 40-60 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 136 | 40-60 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 98 | 60-80 | 0.29 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 136 | 60-80 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 98 | 80-100 | 0.29 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 136 | 80-100 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 117 | 0-20 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 154 | 0-20 | 0.20 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 117 | 20-40 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 154 | 20-40 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 117 | 40-60 | 0.28 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 154 | 40-60 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 117 | 60-80 | 0.31 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 154 | 60-80 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 117 | 80-100 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 154 | 80-100 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 136 | 0-20 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 180 | 0-20 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 136 | 20-40 | 0.25 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 180 | 20-40 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 136 | 40-60 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 180 | 40-60 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 136 | 60-80 | 0.38 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 180 | 60-80 | 0.30 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 136 | 80-100 | 0.35 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41220 | 180 | 80-100 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 154 | 0-20 | 0.23 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 30 | 0-20 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 154 | 20-40 | 0.34 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 30 | 20-40 | 0.24 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 154 | 40-60 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 30 | 40-60 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 154 | 60-80 | 0.30 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 30 | 60-80 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 154 | 80-100 | 0.30 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 30 | 80-100 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 180 | 0-20 | 0.26 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 54 | 0-20 | 0.27 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 180 | 20-40 | 0.27 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 54 | 20-40 | 0.26 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 180 | 40-60 | 0.28 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 54 | 40-60 | 0.28 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 180 | 60-80 | 0.30 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 54 | 60-80 | 0.29 | 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 180 | 80-100 | 0.30 |
| 2011 | 2-3 | 2-3_41310 | 54 | 80-100 | 0.29 | | | | | | |

Annexe 5. Résultats d'expérimentation virtuelle

5.1. Résultats obtenus pour les scénarios simulés sans contrainte hydrique

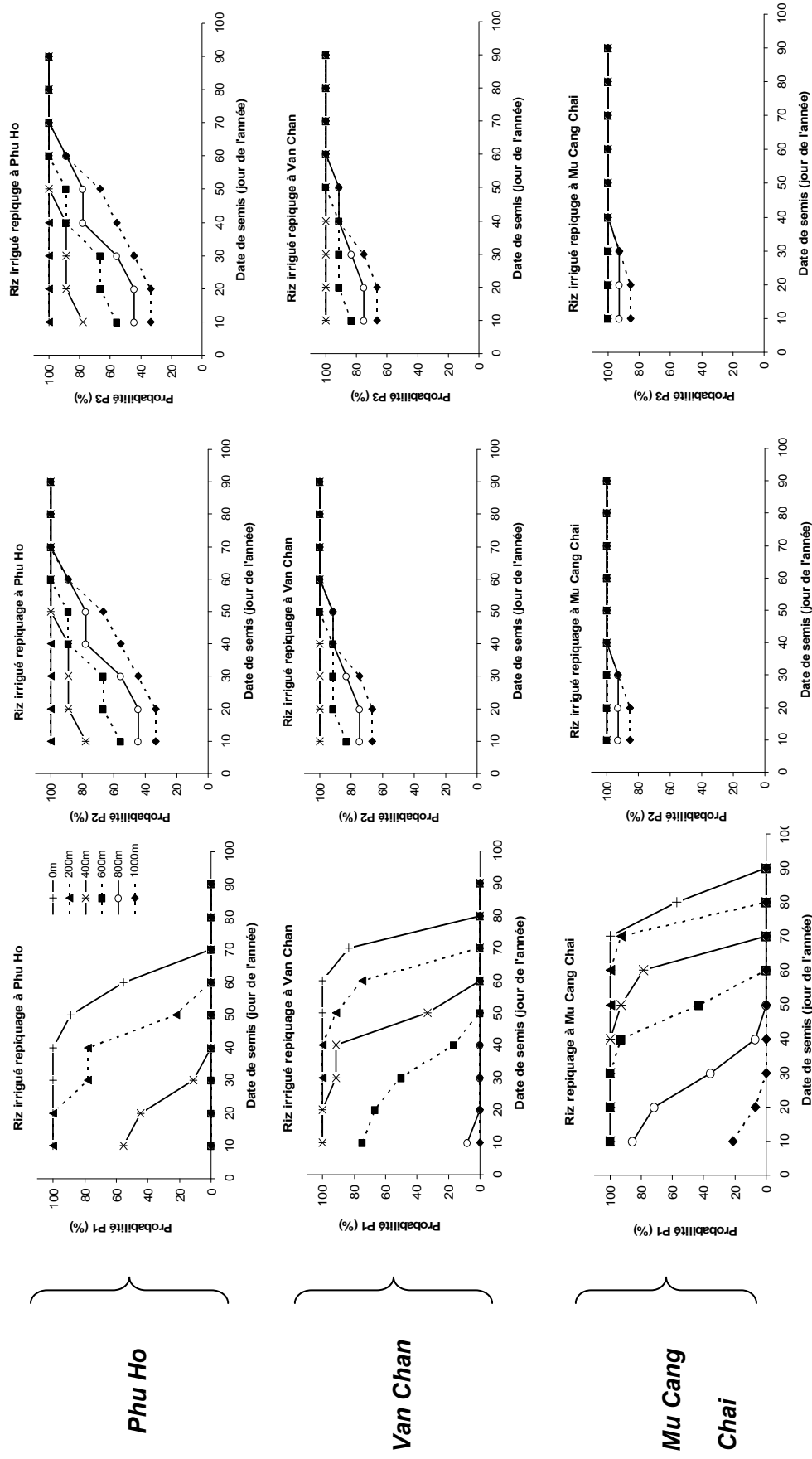


Figure 1: Probabilités P1, P2, P3 obtenues dans le cas du riz irrigué en repiquage en fonction de la date de semis et de l'altitude, simulées avec TRYSim

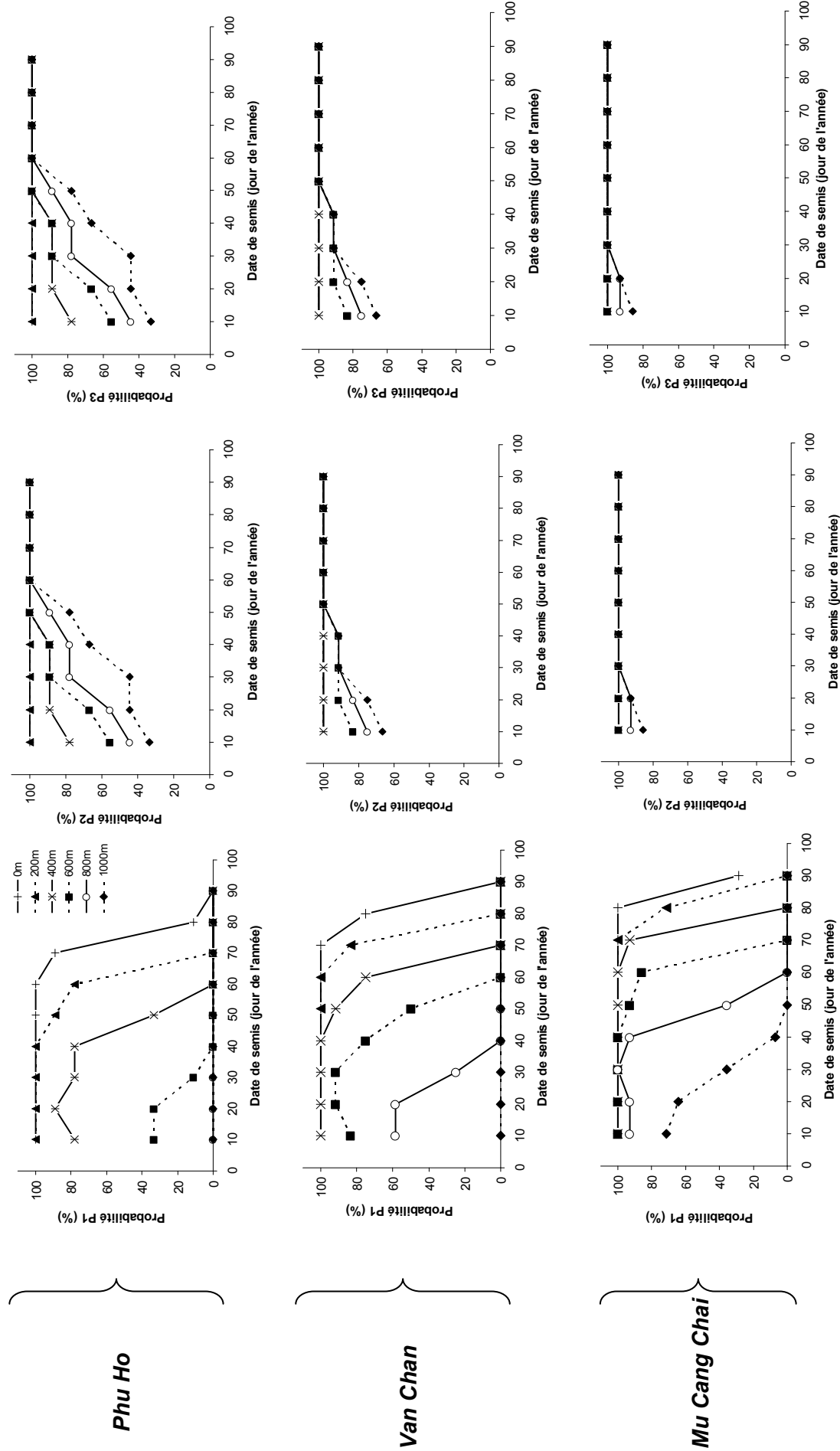


Figure 2: Probabilités P1, P2, P3 obtenues dans le cas du riz aérobie en fonction de la date de semis et de l'altitude, simulées avec TRYSim

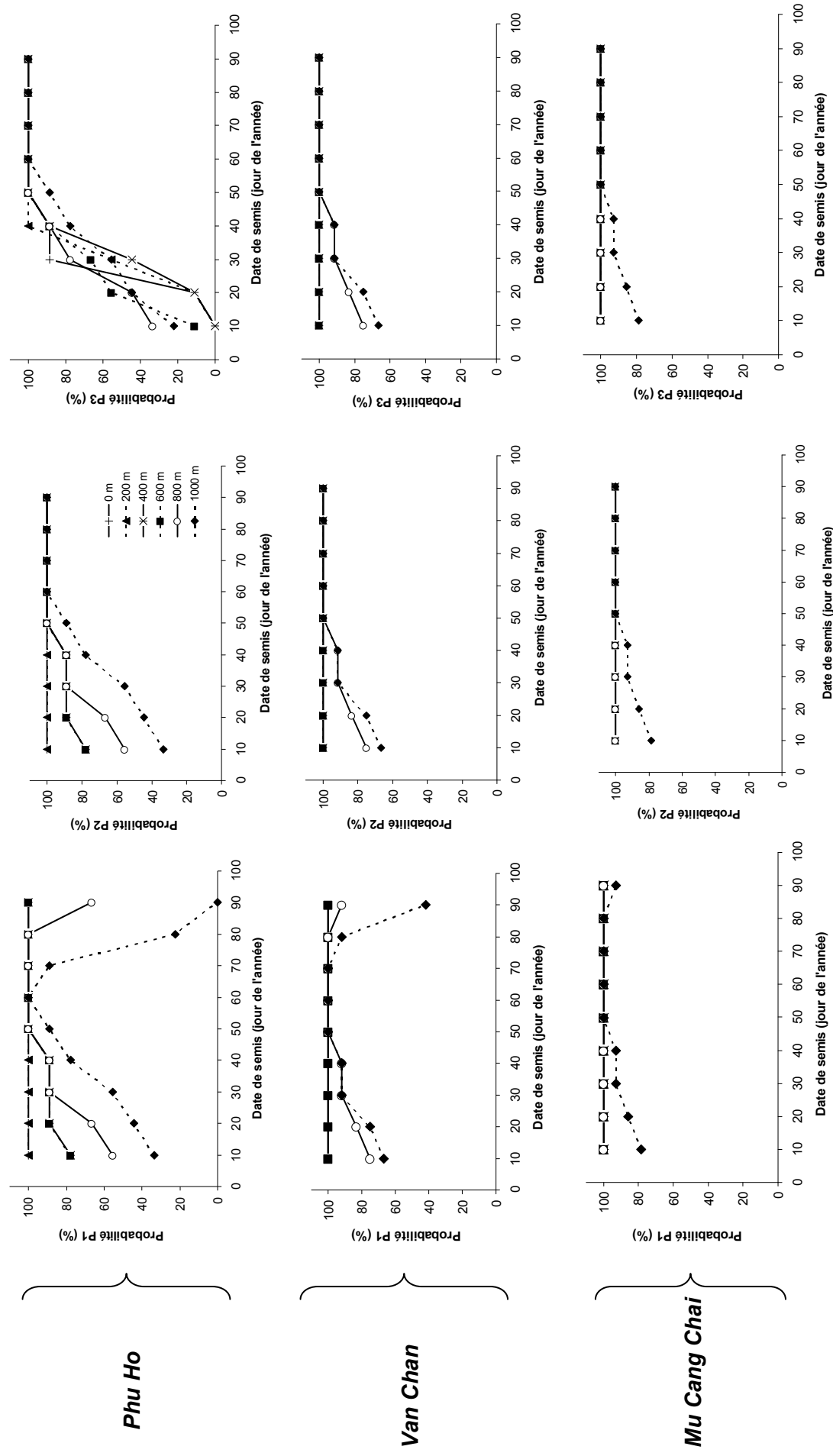


Figure 3: Probabilité P1, P2, P3 obtenues dans le cas du soja en fonction de la date de semis et de l'altitude, simulées avec TRYSim

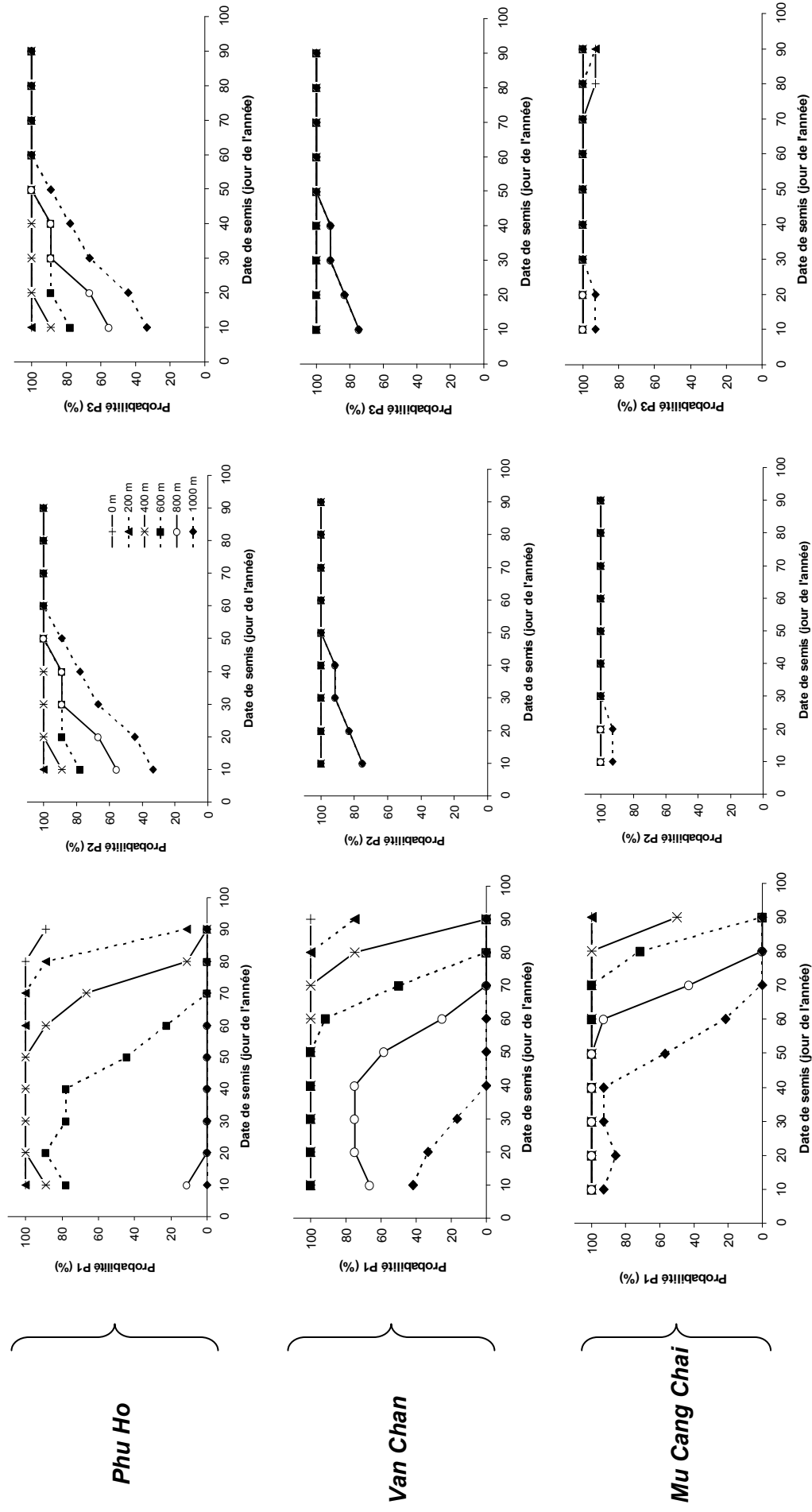


Figure 4: Probabilités P_1 , P_2 , P_3 obtenues dans le cas du maïs en fonction de la date de semis et de l'altitude, simulées avec TRYSim

5.2. Résultats obtenus pour les scénarios simulés avec contrainte hydrique

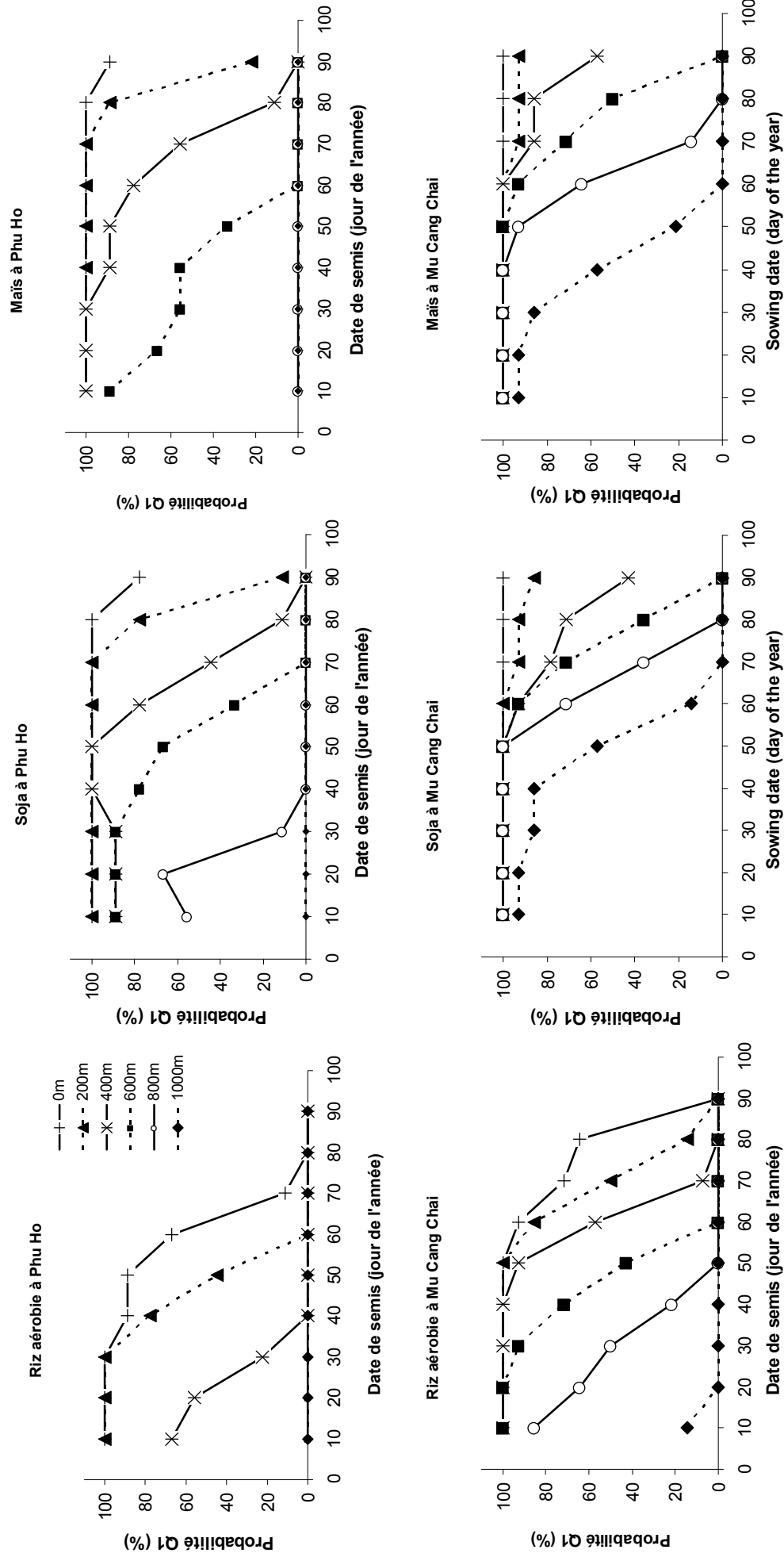


Figure 5: Probabilité Q1 obtenues pour les trois cultures étudiées en fonction de la date de semis et de l'altitude dans le cas d'un sol sans plancher limitant la descente des racines, simulées avec WaTRYSim à Phu Ho et Mu Cang Chai

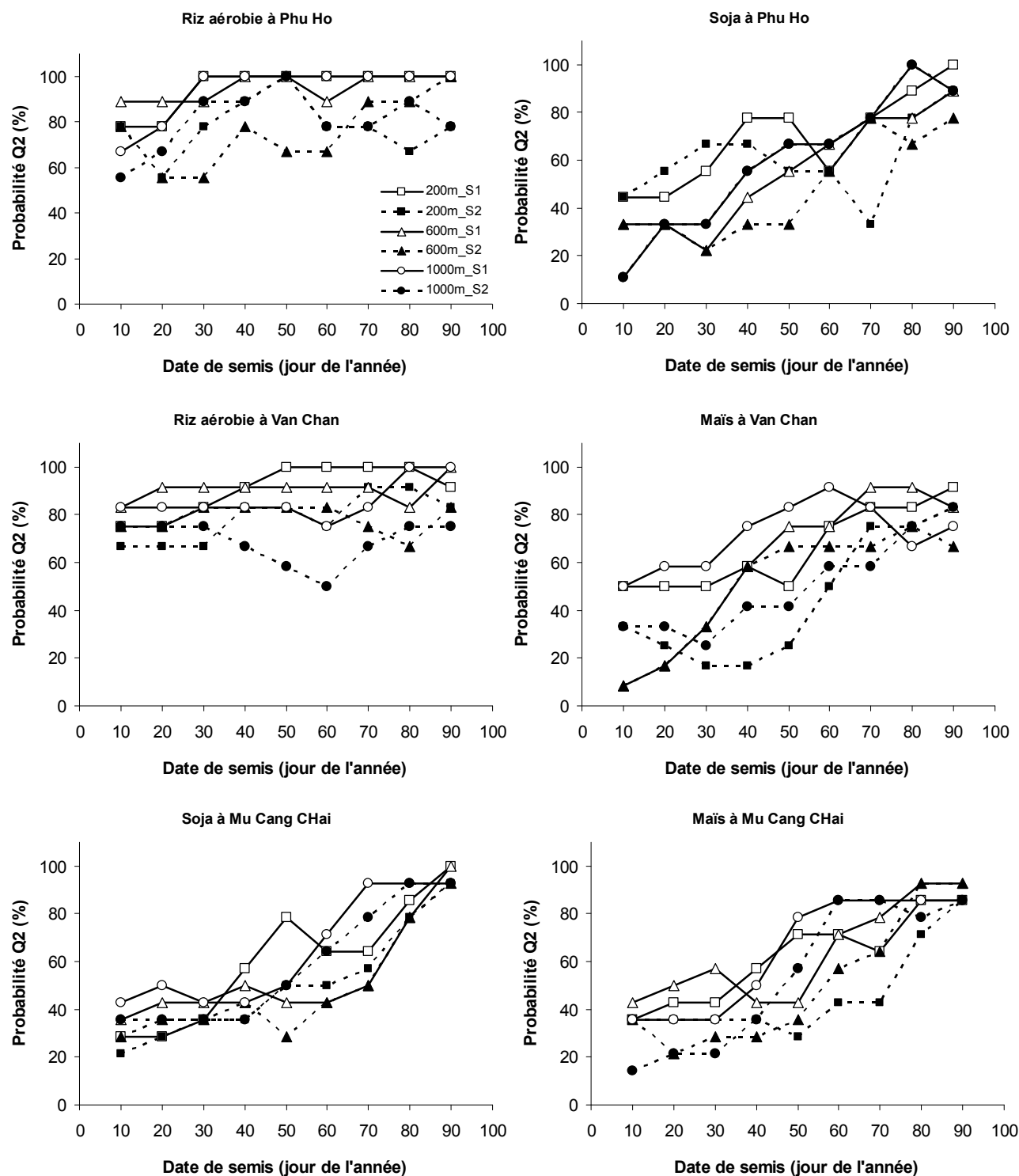


Figure 6: Probabilité Q2 obtenues pour les trois cultures étudiées en fonction de la date de semis et de l'altitude, simulées avec WaTRYSim à Phu Ho, Van Chan et Mu Cang Chai.

S1 : type de sol sans plancher limitant la descente des racines ; S2 : type de sol avec plancher imperméable à 40 cm de profondeur limitant la descente des racines